

# 信息物理系统计算基础

## 概念、设计方法和应用

[德] 迪特玛 P. F. 莫勒 (Dietmar P. F. Möller) 著

张海涛 罗丹琪 译

Guide to Computing Fundamentals in Cyber-Physical Systems  
Concepts, Design Methods, and Applications

Computer Communications and Networks

Dietmar P.F. Möller

### Guide to Computing Fundamentals in Cyber-Physical Systems

Concepts, Design Methods, and  
Applications

Springer



机械工业出版社  
China Machine Press

计 算 机 科 学 丛 书

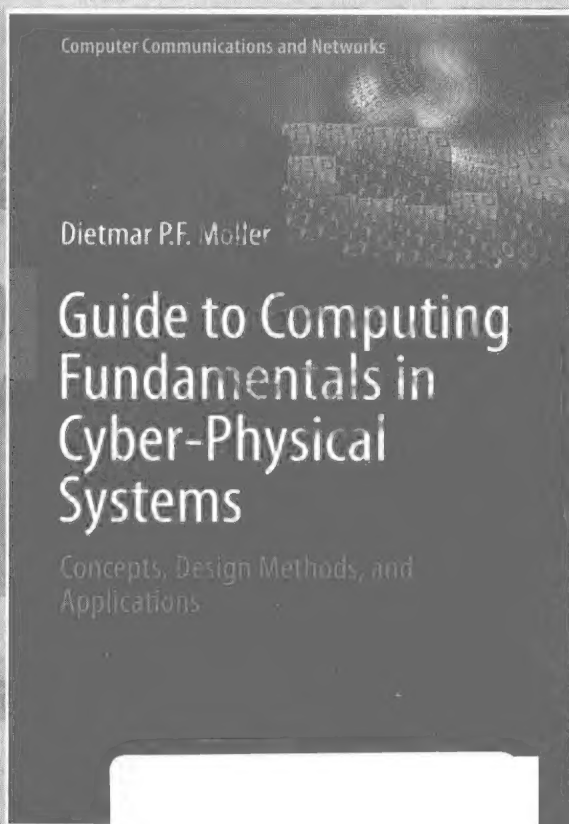
# 信息物理系统计算基础

## 概念、设计方法和应用

[德] 迪特玛 P. F. 莫勒 (Dietmar P. F. Möller) 著

张海涛 罗丹琪 译

Guide to Computing Fundamentals in Cyber-Physical Systems  
Concepts, Design Methods, and Applications



机械工业出版社  
China Machine Press

## 图书在版编目 ( CIP ) 数据

信息物理系统计算基础：概念、设计方法和应用 / ( 德 ) 迪特玛 P. F. 莫勒 ( Dietmar P. F. Möller ) 著；张海涛，罗丹琪译. —北京：机械工业出版社，2018.2

( 计算机科学丛书 )

书名原文：Guide to Computing Fundamentals in Cyber-Physical Systems：Concepts, Design Methods, and Applications

ISBN 978-7-111-59145-0

I. 信… II. ① 迪… ② 张… ③ 罗… III. ① 互联网络—应用 ② 智能技术—应用  
IV. ① TP393.4 ② TP18

中国版本图书馆 CIP 数据核字 ( 2018 ) 第 030451 号

### 本书版权登记号：图字 01-2017-2014

Translation from the English language edition: *Guide to Computing Fundamentals in Cyber-Physical Systems: Concepts, Design Methods, and Applications* by Dietmar P. F. Möller.

Copyright © Springer International Publishing Switzerland 2016.

This Springer imprint is published by Springer Nature.

The registered company is Springer International Publishing AG.

Allrights reserved.

本书中文简体字版由 Springer 权机械工业出版社独家出版。未经出版者书面许可，不得以任何方式复制或抄袭本书内容。

本书从基本概念、设计方法和应用实例三个方面入手，系统全面地介绍了嵌入式系统、信息物理系统、物联网、普适计算等方面的基础知识和基本原理，并介绍了信息物联网融合系统在数字制造 / 工业 4.0 方面的应用场景和社会影响。

本书既可以作为相关专业高年级本科生和研究生的教材，也适于相关领域的学者和工业界人士阅读。

出版发行：机械工业出版社 ( 北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码：100037 )

责任编辑：唐晓琳

责任校对：李秋荣

印 刷：北京瑞德印刷有限公司

版 次：2018 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

开 本：185mm×260mm 1/16

印 张：18

书 号：ISBN 978-7-111-59145-0

定 价：99.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

客服热线：( 010 ) 88378991 88361066

投稿热线：( 010 ) 88379604

购书热线：( 010 ) 68326294 88379649 68995259

读者信箱：hzjsj@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问：北京大成律师事务所 韩光 / 邹晓东



文艺复兴以来，源远流长的科学精神和逐步形成的学术规范，使西方国家在自然科学的各个领域取得了垄断性的优势；也正是这样的优势，使美国在信息技术发展的六十多年间名家辈出、独领风骚。在商业化的进程中，美国的产业界与教育界越来越紧密地结合，计算机学科中的许多泰山北斗同时身处科研和教学的最前线，由此而产生的经典科学著作，不仅擘划了研究的范畴，还揭示了学术的源变，既遵循学术规范，又自有学者个性，其价值并不会因年月的流逝而减退。

近年，在全球信息化大潮的推动下，我国的计算机产业发展迅猛，对专业人才的需求日益迫切。这对计算机教育界和出版界都既是机遇，也是挑战；而专业教材的建设在教育战略上显得举足轻重。在我国信息技术发展时间较短的现状下，美国等发达国家在其计算机科学发展的几十年间积淀和发展的经典教材仍有许多值得借鉴之处。因此，引进一批国外优秀计算机教材将对我国计算机教育事业的发展起到积极的推动作用，也是与世界接轨、建设真正的世界一流大学的必由之路。

机械工业出版社华章公司较早意识到“出版要为教育服务”。自1998年开始，我们就将工作重点放在了遴选、移译国外优秀教材上。经过多年的不懈努力，我们与Pearson, McGraw-Hill, Elsevier, MIT, John Wiley & Sons, Cengage等世界著名出版公司建立了良好的合作关系，从他们现有的数百种教材中甄选出Andrew S. Tanenbaum, Bjarne Stroustrup, Brian W. Kernighan, Dennis Ritchie, Jim Gray, Alfred V. Aho, John E. Hopcroft, Jeffrey D. Ullman, Abraham Silberschatz, William Stallings, Donald E. Knuth, John L. Hennessy, Larry L. Peterson等大师名家的一批经典作品，以“计算机科学丛书”为总称出版，供读者学习、研究及珍藏。大理石纹理的封面，也正体现了这套丛书的品位和格调。

“计算机科学丛书”的出版工作得到了国内外学者的鼎力相助，国内的专家不仅提供了中肯的选题指导，还不辞劳苦地担任了翻译和审校的工作；而原书的作者也相当关注其作品在中国的传播，有的还专门为其书的中译本作序。迄今，“计算机科学丛书”已经出版了近两百个品种，这些书籍在读者中树立了良好的口碑，并被许多高校采用为正式教材和参考书籍。其影印版“经典原版书库”作为姊妹篇也被越来越多实施双语教学的学校所采用。

权威的作者、经典的教材、一流的译者、严格的审校、精细的编辑，这些因素使我们的图书有了质量的保证。随着计算机科学与技术专业学科建设的不断完善和教材改革的逐渐深化，教育界对国外计算机教材的需求和应用都将步入一个新的阶段，我们的目标是尽善尽美，而反馈的意见正是我们达到这一终极目标的重要帮助。华章公司欢迎老师和读者对我们的工作提出建议或给予指正，我们的联系方式如下：

华章网站：[www.hzbook.com](http://www.hzbook.com)

电子邮件：[hzjsj@hzbook.com](mailto:hzjsj@hzbook.com)

联系电话：(010) 88379604

联系地址：北京市西城区百万庄南街1号

邮政编码：100037



华章科技图书出版中心



近年来，全球的制造业强国都在全面推动以数字化、网络化、智能化为特征的新一轮工业革命，德国的“工业 4.0”和我国的“中国制造 2025”国家战略就是其中的典型代表，其核心目标都是利用信息技术提升当前制造业的智能化水平，而信息物理系统（Cyber-Physical Systems, CPS）则是实现这一目标的核心技术手段。基于 CPS 的设计思想，制造企业首先在制造设备层面实现互联互通和信息共享，然后在此基础上实现生产过程的智能化管控，最终实现各个生产环节的协同运作，从而提升生产效率，打通整个价值链，实现社会化生产。

信息物理系统是信息资源和物理世界有机融合和深度协作的新一代网络化智能系统，它集成计算、通信与控制能力于一体，使物理系统具有动态感知、实时分析、科学决策、精准控制和远程协作等功能，解决生产制造、应用服务过程中的复杂性和不确定性问题，提高资源配置效率，实现资源优化，具有重要而广泛的应用前景，尤其在智能制造、智能交通、智能家居、智能电网、远程医疗、航空航天等领域。虽然信息物理系统的概念来源于嵌入式计算系统和网络计算的融合，但其涉及的技术涵盖了嵌入式计算、传感器、通信、网络、控制、软件工程等信息技术领域的诸多方面，因此，信息物理系统在推动新一轮工业革命的同时，也带来了新的技术融合挑战。

本书是一本介绍信息物理系统相关概念和技术的基础教材，内容基本涵盖了信息物理系统的所有方面。本书首先介绍了系统的基本概念、数学模型、分析方法以及嵌入式计算系统等，然后，在此基础上对信息物理系统进行了详细的描述和深入的分析，接着对物联网和普适计算这两个跟信息物理系统非常相关的概念和技术进行了介绍，并从软件工程的视角分析了信息物理系统的设计流程，最后，本书介绍了信息物理系统在数字制造/工业 4.0 以及未来社会生活中的应用情况。另外，本书非常注重理论与实践相结合，在每章介绍完基本技术内容后，都有实际的应用案例分析，使读者能从具体的应用中更好地理解书中所介绍的技术原理。本书既可以作为相关专业高年级本科生和研究生的教材，也适用于相关领域的学者和工业界人士。

感谢薛玉磊、耿欣、徐政钧、孙滋唱、杜沛伦同学，他们在本书翻译过程中帮助校对了部分书稿，感谢机械工业出版社的编辑在本书翻译过程中提供的帮助。由于时间仓促以及译者能力所限，翻译过程中的瑕疵和错误在所难免，欢迎各位读者批评指正。

张海涛

2017 年 11 月

北京邮电大学

不断变化的市场需求推动着制造业和汽车业的发展。当前，消费者追求的不仅是某件单一的商品（例如一辆汽车），而更多的是寻求一种打包式的综合体验。制造商的生产过程也正在转向自动化，在降低成本的同时提高产品的质量、生产率、安全性、生产速度和竞争力。不断变化的技术投资环境深深地影响着商品价值链、内部协作以及客户对产品与服务的体验。汽车行业在制造业定义的自动化生产范式中一直走在最前列。本书概述了在制造业数字化进程中获得的研究成果和经验。

数字制造/工业 4.0 是在充分适应自动化生产系统条件下的制造业技术转型。因此，数字化技术的发展趋势正集中在制造自动化的新方法上。本书涉及数字化模型的使用、面向制造业的过程规划和控制方法，并将它们与实际的制造子系统、制造部件（硬件）和工具（软件）联系起来。

本书的主要特点是通过信息物理系统建立网络化的虚拟计算机（信息世界）和制造零部件（物理世界）之间的联系。在某种意义上，信息物理系统可以作为一个强大的数字化平台，其具有结构良好、集成度高的特点，而且在制造业的特定使用环境中具有有限的复杂性。因此，以信息物理系统为基础形成的制造系统能够根据外部要求自主地控制、优化和配置特定的物理部件。

本书的核心研究内容涉及一套先进的方法学，该方法学将制造系统部分作为信息物理系统中的物理组件，而将因特网作为信息物理系统中必不可少的信息部分。本书介绍了一系列关于信息物理系统的创新方法，包括当前正在进行的系统和软件工程等方面的研究工作。本书介绍了如何准确地分析信息物理系统的内在复杂性，以及如何在不同的操作条件和场景下预测系统的工程行为，从而在数字制造/工业 4.0 背景下，为当前新兴的技术问题提供充分的学术性解决方案。本书的章节组织合理，表现出作者对学术的严谨性和专业性。因此，本书可以作为相关人员进入信息物理系统研究领域的重要读物，为数字制造/工业 4.0 技术的普及和发展提供了新的参考资料。

我强烈推荐 Dietmar P. F. Möller 教授的这本学术著作，它适合学生、相关领域的学者和热衷于学习先进制造方法学的工业界人士阅读。我相信本书所介绍的方法将在某种程度上改变传统制造与汽车行业中的基本理念，从而带来更好的创新与数字化革命。由于受到大数据、高性能计算、云计算、移动技术和社交媒体的影响，数字化将引领新一波的消费浪潮。尤其对于汽车企业，无论是生产方面，还是客户管理方面，都将开拓新的业务模式，并获取不同的机会。我认为将会有许多读者通过阅读本书而在数字制造和信息物理系统原理上拓宽视野。

K. B. Akhilesh

印度科学院，管理学系

印度班加罗尔

本书的目标是提供全面的、深入的、先进的信息物理系统基本原理及其应用的综述，介绍信息物理系统的基本方法，清楚地展示大量的信息物理系统在整个生产制造工作中的重要位置，并为理解信息物理系统的复杂性提供一个理想的框架。为了这个目标，在处理本书的材料时做了一些选择。本书采用自顶向下的方法介绍系统和嵌入式计算系统的基本原理，并重点讨论信息物理系统和物联网的需求。此外，本书还介绍了普适计算的概念，并描述了一系列基于当前数字化技术的信息物理系统相关的智能产品和服务，这些技术涉及嵌入式、微型计算机、传感器、标签、网络、智能设备等。本书还提供了一个学习框架，使读者可以从中学习到互相关联的知识体系。如果没有这样的参考学习框架，读者就要分别考虑那些彼此孤立和晦涩的术语、标准及工程实践案例。因此，本书的内容涵盖了信息物理系统的所有方面，并为数字制造/工业 4.0 中与信息物理系统相关的诸多问题提供一个技术框架。书中的主题包括作为信息物理系统典型应用场景的定制化生产、网络化制造、开放式和封闭式生产线等，以及它们在系统和软件工程中的相关技术方法。

首先，本书介绍了系统研究的概况，并介绍了其四个基本步骤：（1）建模；（2）建立数学方程，使用输入、输出和状态变量的标准形式描述系统；（3）分析系统；（4）设计系统。此外，还介绍了在嵌入式计算系统中系统扩展的数学背景。嵌入式计算系统是针对特定应用或产品的基于计算机的专用系统，书中对其作为信息物理系统平台的重要性进行了讨论。

然后，本书详细地描述了新一代的工程系统——信息物理系统，它和物联网是数字制造/工业 4.0 范式中最重要的重要组成部分。物联网是一个使用标准因特网协议簇（TCP/IP）为全球数十亿用户提供服务的互联计算机网络系统。在此基础上，本书还介绍了普适计算（也称为泛在计算），并对当前相关技术（智能物体）进行了介绍，包括嵌入式、传感器、标签、网络、其他（移动、可穿戴、无线）智能设备，以及智能环境（嵌入式计算系统、传感器执行器网络）和智能交互（设备、环境和任何事物之间的紧密集成与协作）等。针对上述方法本身的复杂性，系统和软件工程是一种基于特定的思维模式及基本原理设计复杂技术系统的跨学科方法，它将信息物理系统作为数字化制造系统/工业 4.0 中智能化和网络化的组件，称为智能工厂方法。

然而，本书不能详细地描述信息物理系统和数字制造/工业 4.0 中所有的创新内容。因此，读者可以参考每章后列出的补充材料，例如教材、参考指南、用户手册等，以及书中涉及的几个主题的网络资料。

最后，本书从不同的工业实践和学术研究中总结了一些实际的案例研究，以说明数字制造/工业 4.0 背景下的信息物理系统相关技术的实际应用情况和正在进行的研究工作。

本书可作为信息物理系统相关大学课程的教材或参考书，也可供计算机科学、电子与计算机工程、信息技术和信息系统、应用数学、运筹学以及商务信息和管理等相关专业的学生阅读。这本书的内容对于那些对信息物理系统设计感兴趣的研究人员也非常有用。公



司中相关部门的工程师也可以使用书中描述的原则来进行产品设计。

如果读者从未接触过信息物理系统相关的技术方法,可能很难快速阅读和理解书中的材料,因为信息物理系统和数字制造/工业 4.0 是一个建立在计算机科学、工程、数学、运筹学等学科之上的多学科交叉领域。具体的案例研究已经包括在相关的主题中,以帮助读者理解和掌握书中的技术内容。读者需要对概率统计和微积分有一定的了解,最好具有一些系统和软件工程方面的经验。

本书可以作为一门课程的主教材,其内容可以覆盖一个季度(30 小时)或一个学期(45 小时)的课程。教师可以自主选择主题,并添加自己的案例研究。本书还可用于自学,供相关领域工程师和科学家进行在职培训,以及作为信息物理系统与数字制造/工业 4.0 的从业人员和研究人员的参考书。

对于使用本书作为教材的教师,可以从 [www.springer.com/book/9783319251769](http://www.springer.com/book/9783319251769) 下载各种教学辅助材料,包括一整套用于讲课的幻灯片和所有课堂录像<sup>①</sup>。

本书分为 8 章,每章可以独立阅读,也可以连续阅读。

第 1 章介绍了系统研究的基本内容,包括四个基本步骤:(1)建模;(2)建立数学方程,使用输入、输出和状态变量的标准形式描述系统;(3)分析系统;(4)设计系统。该章还基于可控性、可观测性和可识别性理论介绍了线性系统中成分分析的概念,并通过分析其行为或复合结构介绍了线性系统的解析方法。最后,给出了确定系统稳态误差的方法,该分析方法描述了一个系统随着时间推移到无穷时输入和输出之间的差异。

第 2 章介绍了嵌入式计算系统的相关概念及其硬件结构,以及一种确定嵌入式计算系统设计指标的方法,该方法定义了特定需求规格下的设计准确性。此外,该章详细地介绍了针对不同控制规律的数学符号以及软硬件协同设计的主要方法。

第 3 章总结了第 1 章和第 2 章的技术内容,并在此基础上介绍了信息物理系统的相关概念,该章的目标是确保不同工程和学科背景的读者对信息物理系统有相同的理解。信息物理系统通过在物理系统中添加信息功能,将计算和通信能力嵌入物理过程,并与物理过程进行交互。因此,第 3 章专注于信息物理系统的设计建议,根据信息物理系统的需求突出相应的设计方法。信息物理系统涵盖了极其广泛的应用领域,通过采用抽象的技术知识和设计工具,能够更方便地对系统进行设计,并通过将最佳实践应用于信息物理应用程序,设计更可靠的信息物理系统。技术和经济方面的驱动力创造了一个能够实现一系列新功能的信息物理环境。同时,该章还详细地描述了智慧城市和大量信息物理系统应用主题。智慧城市以数字化技术为基础,介绍了如何利用互联网来建立更有效的智慧城市基础设施和服务。

第 4 章介绍了使用标准互联网协议簇(TCP/IP)为全球数十亿用户提供服务的互联计算机网络系统,并介绍了其使用的相关技术,然后详细地介绍了无线射频识别技术(RFID)、无线自动识别技术以及无线传感器网络技术,这些技术在远程环境监测和目标跟踪等方面有着重要的应用。这些应用是由更小、更便宜、更智能的传感器所实现的。该章还介绍了电力线通信技术在智能家居领域的应用情况。

第 5 章对普适计算相关技术(智能物体)进行了介绍,包括嵌入式技术、传感器、标签、

① 关于本书教辅资源,需要的教师可与施普林格亚洲有限公司北京代表处联系,电话:010-8267 0211-895,电子邮件:parick.chen@springer.com。——编辑注

网络、其他（移动、可穿戴、无线）智能设备，以及智能环境（嵌入式计算系统、传感器执行器网络）和智能交互（设备、环境和任何事物之间的紧密集成和协作）等。因此，该章涵盖了普适计算和相关应用中涉及的标签、传感和控制等重要主题（例如自治系统），并对其复合结构和容错行为进行了分析。

第6章介绍了系统和软件工程的基本概念及相关技术。作为一种跨学科的工程技术方法，其主要侧重于在系统的生命周期中如何成功地设计、实施、评估和管理复杂的工程系统。该章还讨论了信息物理系统的设计挑战以及如何使用 Cradle 进行需求定义和管理。Cradle 是一个系统工程和需求管理工具，可将整个项目生命周期整合到一个大规模的、可扩展的、集成的多用户软件中。此外，该章还介绍了软件工程的相关概念，尤其是 V 模型和敏捷软件开发方法，以及信息物理系统中软件设计的不同要求。

第7章首先简要介绍了制造业和能源技术及其在工业革命方面的机会，还介绍了智能制造、敏捷制造和智能工厂相关的数字制造技术，它们是数字制造/工业 4.0 的重要基础。根据这些知识，该章还介绍了个性化生产的概念，这是智能工厂领域的重要应用，也涉及网络制造一体化行业 and 智能供应链的理念，介绍了产品数据在互联网上共享的服务宗旨。此外，还讨论了开放式和封闭式生产线的范例，以及数字制造/工业 4.0 的网络安全方面的重要议题。最后，该章用 6 个在工业和学术研究领域的案例来深入探讨数字制造/工业 4.0 项目。

第8章介绍了由现代全球化的数字化工作环境与制造业的发展带来的技术变化，并介绍了技术在未来工作生活中的社会影响。因此，该章涉及数字化和自动化对未来经济、社会和组织挑战。该章还介绍了在数字制造/工业 4.0 方面的工作领域中不断变化的需求。同时，向读者介绍了更多的产品个性化定制以及全球数字化转型的主要概念。

除了方法和技术内容外，本书中的所有章节均包含了章节相关的深入理解问题（练习），以帮助读者确定是否获得了所需的知识，判断可能的知识差距，并解决存在的问题。此外，所有章节还包括了进一步阅读的参考文献和阅读建议。

我要特别感谢内布拉斯加大学林肯分校的 Patricia Worster 对校对工作提供的帮助，感谢 Springer 出版社的 Simon Rees 帮助协调出版社和作者之间的工作。此外，还要感谢 Simulation Science Center Clausthal-Göttingen 的 Alexander Herzog，根据我的草图画出本书的插图。同时，我衷心地感谢已发表的信息物理系统相关材料的所有作者，书中直接或间接引用了他们的材料，感谢他们为本书做出的贡献。

最后，我要深深地感谢我的妻子 Angelika、女儿 Christina 以及孙子 Hannah 和 Karl，感谢他们的鼓励、耐心和理解。

Dietmar P. F. Möller

德国，克劳斯塔-采勒费尔德

出版者的话	
译者序	
序言	
前言	
第 1 章 系统概述	1
1.1 系统研究	1
1.2 标准的系统描述形式	6
1.2.1 输入输出描述	6
1.2.2 状态变量描述	7
1.3 可控性、可观测性和可识别性	11
1.4 线性系统模型的分析方案	14
1.4.1 使用拉普拉斯变换的状态方程的解	16
1.4.2 线性向量方程组的特征值	17
1.5 系统稳态误差	18
1.6 系统稳定性分析案例研究	19
1.7 练习	21
参考文献	21
第 2 章 嵌入式计算系统概述	22
2.1 嵌入式计算系统	22
2.2 嵌入式计算系统的硬件架构	25
2.2.1 可编程逻辑器件	26
2.2.2 可编程门阵列	28
2.3 设计指标	32
2.4 嵌入式控制系统	34
2.4.1 控制	35
2.4.2 反馈控制	35
2.4.3 嵌入式控制系统的反馈组件	38
2.5 软硬件协同设计	42
2.6 案例研究：基于 FPGA 的 CPU 内核	45
2.7 练习	49
参考文献	50
第 3 章 信息物理系统概述	51
3.1 信息物理系统	51
3.2 信息物理系统设计建议	55
3.3 信息物理系统需求	59
3.3.1 需求工程	59
3.3.2 互操作性	60
3.3.3 实时系统	60
3.3.4 GPU 计算	61
3.4 信息物理系统应用	62
3.4.1 通信	64
3.4.2 消费者交互	64
3.4.3 能源	65
3.4.4 基础设施	67
3.4.5 健康保障	69
3.4.6 制造	71
3.4.7 军事	73
3.4.8 机器人	74
3.4.9 交通	76
3.5 智慧城市和万联网	78
3.6 案例研究：信息物理车辆跟踪系统	80
3.6.1 车辆跟踪系统	80
3.6.2 基于 RFID 的车辆跟踪系统	81
3.6.3 需求分析	82
3.6.4 进一步的研究	83
3.7 练习	84
参考文献	84
第 4 章 物联网概述	89
4.1 物联网	89
4.2 射频识别技术	92
4.3 无线传感器网络技术	96
4.3.1 传感器技术	96
4.3.2 传感器网络	97
4.3.3 无线传感器网络	100
4.4 电力线通信	102
4.4.1 物联网和电力线通信	104
4.4.2 智能电网	105
4.4.3 智能家居能源管理	107
4.5 RFID 应用	107
4.6 案例研究：行李跟踪系统	110
4.7 练习	114



参考文献 .....	116	6.5.1 在港口和船舶上跟踪和监测集装箱 .....	189
第5章 普适计算 .....	119	6.5.2 跟踪和监测从海港运输到无水港的集装箱 .....	190
5.1 普适计算发展史 .....	119	6.6 练习 .....	193
5.2 普适计算基础 .....	121	参考文献 .....	194
5.2.1 在普适空间中学习 .....	122	第7章 数字制造和工业4.0 .....	196
5.2.2 智能家居和电力线通信 .....	125	7.1 制造业简介 .....	196
5.2.3 普适计算的核心特性 .....	128	7.1.1 智能和敏捷制造 .....	198
5.2.4 普适计算形式化用例 .....	130	7.1.2 智能工厂 .....	201
5.3 智能设备：组件和服务 .....	131	7.1.3 工业4.0 .....	206
5.4 标记、传感和控制 .....	133	7.2 个性化生产 .....	209
5.4.1 标记 .....	133	7.3 网络制造一体化工业 .....	210
5.4.2 传感 .....	135	7.4 开放式和封闭式生产线 .....	212
5.4.3 控制 .....	138	7.5 数字制造/工业4.0的信息安全 .....	213
5.5 普适计算中的自治系统 .....	141	7.6 数字制造/工业4.0案例研究 .....	216
5.6 案例研究：机器人操纵器 .....	143	7.6.1 汉诺威中心的生产工程（PZH）方法 .....	216
5.7 练习 .....	146	7.6.2 钢铁行业的方法 .....	221
参考文献 .....	147	7.6.3 博世软件创新方法 .....	224
第6章 系统和软件工程 .....	150	7.6.4 保险业务方法 .....	228
6.1 系统工程简介 .....	150	7.6.5 德国工业4.0工作组方法 .....	231
6.1.1 系统工程标准 ISO/IEC 15288 .....	153	7.6.6 美国数字制造与创新设计研究所方法 .....	234
6.1.2 自顶向下的系统工程方法 .....	160	7.7 练习 .....	236
6.1.3 开放式机电一体化自动化工程平台 .....	163	参考文献 .....	236
6.2 信息物理系统中的设计挑战 .....	164	第8章 未来社会生活中的影响 .....	239
6.2.1 使用 Cradle 的需求定义和管理 .....	166	8.1 简介 .....	239
6.2.2 需求定义与管理活动 .....	167	8.2 经济、社会和组织方面的挑战 .....	240
6.2.3 INCOSE 系统工程手册（3.2.2 版本）可追溯性 .....	178	8.3 在工作中改变需求 .....	241
6.3 软件工程简介 .....	181	8.4 产品个性化和全球影响力的变化因素 .....	243
6.3.1 V 模型 .....	182	8.5 练习 .....	245
6.3.2 敏捷软件开发方法 .....	184	参考文献 .....	246
6.3.3 V 模型与敏捷软件开发方法的比较 .....	185	术语表 .....	247
6.4 信息物理系统软件设计需求 .....	186	索引 .....	254
6.5 海域案例研究 .....	189		

## 系统概述

本章首先简要介绍系统的研究概况。1.1节介绍建模、建立数学方程、分析和设计四个步骤。1.2节介绍系统研究的第二步，参照输入、输出的标准形式和系统的状态变量建立描述系统的数学方程。1.3节介绍基于系统可控性、可观测性和可识别性的理论线性系统的组件分析的主要概念，它们以数学符号形式显示了在其假设下可以实现的内容。1.4节介绍线性系统的解析方法，通过分析它们的行为或复合结构来检查系统对输入需求的响应。1.5节介绍确定系统的稳态误差的方法，这种分析方法定义了随着时间的推移，系统在输入和输出之间的差异。1.6节提供了一个关于系统稳定性分析概念的案例研究。1.7节包含了系统主题相关的综合问题，并提供了进一步阅读的参考文献和建议。

## 1.1 系统研究

物理系统和信息物理系统的研究和设计包括以下基础步骤：

- 建模；
- 建立数学方程式；
- 分析；
- 设计。

它代表了一种新的工程和科学方法，研究组件与组件之间的关系如何影响系统的整体行为，以及系统如何与其环境相互作用并形成一定的关系。

第一步建模，涉及识别确定一个易于学习且描述了系统显著特征的模型。一般来说，系统根据固定计划（Kamal 2008）进行工作，组织或执行一项或多项任务。此外，系统可以作为现实世界中的对象被引入，其精确特性通常是未知的。将测试信号应用于系统的输入，通常可以根据测量的系统输出数据确定系统的特性。因此，存在两种确定性测试信号，即单位阶跃和斜坡函数，它们的关系如以下表达式所示（Moeller 2003）。

- 单位阶跃：

$$u_w(t) = \begin{cases} 0, & t < t_0 \\ 1, & t_0 < t < t_1 \\ 1, & t > t_1 \end{cases}$$

- 斜坡函数：

$$U_R(t) = \begin{cases} 0, & t < t_0 \\ a \frac{t - t_0}{t_1 - t_0}, & t_0 < t < t_1 \\ a, & t > t_1 \end{cases}$$

单位阶跃和斜坡函数以及许多其他函数在连续的分段特征的问题中被证明是非常有价值的。如上述等式所述，可以指定切换事件的顺序。当给定的功能在时间上延迟时，输出结果将是一样的。

更一般来说，建模涉及系统模型的开发过程，这个过程是现实世界对象的抽象。大多数数

学模型用于研究针对各种不同目的的系统，以解释系统的行为或数据，并提供数据的紧凑表示等。因此，建模是处理物理和信息物理系统中复杂问题的有效方法。用于建模系统的各种方法通常需要结合以下信息：

- 目标和宗旨；
- 边界；
- 必要的细节水平；
- 先验知识；
- 不可测数据和/或状态空间变量；
- 实验数据集；
- 相关组件；
- 系统输入和输出。

2

重要的是要注意，当今科学和工程学科的系统模型的使用范围可能会有所不同。控制系统工程涉及理解和控制系统部分，以便为社会提供有用的经济产品。这主要是要求系统综合和优化。工程师主要对在正常条件下运行的系统的数学模型感兴趣。工程师使用模型的目标是让控制系统最优化或至少使其不会偏离安全操作条件的边缘。相比之下，在生命科学中，医学科学家并不完全关心在正常条件下运行的维持生命运转的系统如循环系统的数学模型。研究生命科学的科学家更喜欢充分描述在正常工作范围外的系统行为的数学模型，这在医学上可以解释为疾病的指标，例如在循环系统处于高血压情况下。因此，高血压是一种正常情况外的系统状况。

关于可用模型的范围，适当的概念和数学表示水平取决于模型的目标、先验知识的可用性、通过实验和系统测量收集的数据、系统参数的初始估计和其他约束以及系统状态。因此，系统的数学表示取决于所需级别的限制，它们是：

- 行为级别。可以以表示系统行为的一组轨迹按时间顺序记录测量的形式来描述系统的行为级别。因此，行为级别是很重要的，因为系统的实验就处于这一级别，输入输出关系可以用以下方式表示：

$$\underline{y}(t) = F(\underline{u}(t), t)$$

其中  $\underline{u}(t)$  表示输入集， $\underline{y}(t)$  作为输出集， $F$  表示传递函数，描述了状态结构级别。这个结果是通过迭代，在一组称为系统行为的轨迹中产生的。内部状态集表示状态转换函数，它提供了依据当前的状态计算将来状态的规则，如下所示：

$$\underline{y}(t) = G(\underline{u}(t), \underline{x}(t), t)$$

因此，系统状态表示在时间  $t = t_0$  时指定的最小数值集合，以便为属于给定输入集合的任何输入在  $t \geq t_0$  时唯一地预测系统的行为，只要  $t \geq t_0$  时，输入集合的每个元素都是确定的。这样的数值称为状态变量。

3

- 复合结构级别。在此级别中，通过连接可以作为网络描述引入的基本黑盒来描述系统。基本黑盒是组件，每一个都必须通过系统描述在状态结构级别中引入。此外，每个组件必须具有输入和输出变量以及确定组件互联的规范，并将输入和输出变量进行对接。

因为系统非常复杂，并且可能由于数据集不足而不能对系统进行精确描述 (Mitchel 2009)，所以开发数学系统模型时会存在很多困难。因此，在建立一个真实世界系统的数学模型时，首先需要选择一个模型结构，然后选择一些形式的参数估计来确定模型的参数值。正是由于这个原因，有时候忽略系统本身的一些特性而开发简化的模型可能会是一种更好的选择。一个过于复杂的数学模型会造成很多困难。一般来说，在开发现实世界系统的数学模型时，两



个主要因素是重要的：

(1) 一个模型总归是现实事物的简化，但是不能太简单以至于得出的答案是不正确的。

(2) 一个模型必须要简单到易于使用和学习。

因此，一个合适的系统模型是复杂方程中数学难度与最终结果准确性的折中。相应的关系如图 1.1 所示。

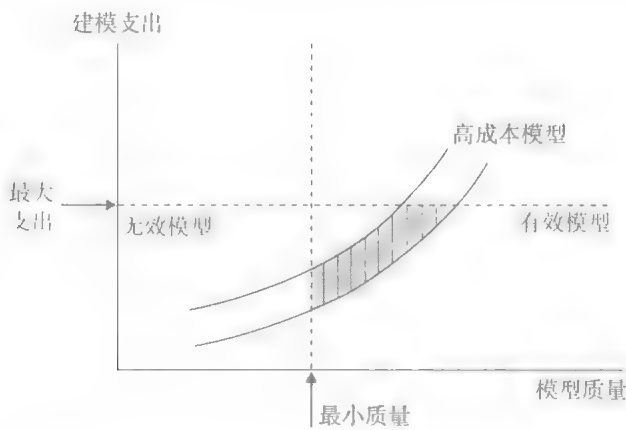


图 1.1 建模支出（成本）与准确度（模型质量）的关系（Möller 2014）

4

从图 1.1 中可以看出，开发成本昂贵的模型是没有充分理由的，因为开发得到的质量不及成本的付出。这一点是很重要的，因为数学模型是一个描述复杂现实系统的非常紧凑的方式。复杂的模型不仅描述了系统输入和输出之间的关系，还提供了对系统结构和内部关系的详细讲解。这是因为要建模的现实世界系统的变量之间的主要关系要被映射到适当的数学表达式中。例如，系统的输入和输出变量之间的关系可以通过一组普通微分方程来描述，并且这取决于系统的复杂性。

一般来说，获得现实世界系统的数学模型有两种不同的方法：

- 理论或公理化建模的演绎法，一种自下而上的方法，从一个比较成熟的代表数学模型的系统对象的先验知识开始。在现实情况下，在评估这些模型的适用范围时会出现问题。如图 1.2 所示，演绎建模方法通过经验模型验证证明步骤之后，可以将模拟结果与系统的已知数据进行比较，验证模型是否符合误差标准。
- 实验建模的经验方法，实验建模的经验方法是基于对系统输入和输出的测量而建立的。基于这些测量，经验模型可以实现现实世界系统的模型，如图 1.3 所示。基于先验知识，实验建模过程的特征信号流序列用于确定数学描述的模型结构，所用知识必须与所使用的误差准则相一致，并选择相同方式作为演绎建模方法的性能标准。

定义  $e$  表示误差范围，这取决于实际系统输出  $y_{RWS}$  的测量值与数学模型输出  $y_{MM}$  的模拟数据之间的差异，如下所示：

$$e := e(y_{RWS}(t), y_{MM}(t))$$

误差标准可以通过最小化性能标准来确定：

$$J = \int_0^t e^2 \cdot dt \rightarrow \text{Min}$$

将从仿真获得的结果与系统数据的结果相比，当在误差标准范围内时，我们认为该模型符合所选择的性能标准。如果开发的模型不符合所选的性能标准，就需要在不同级别中进行修改，演绎建模方案如图 1.2 所示。修改的结果可以理解为模型验证的具体形式，也是一种比以前的开

5

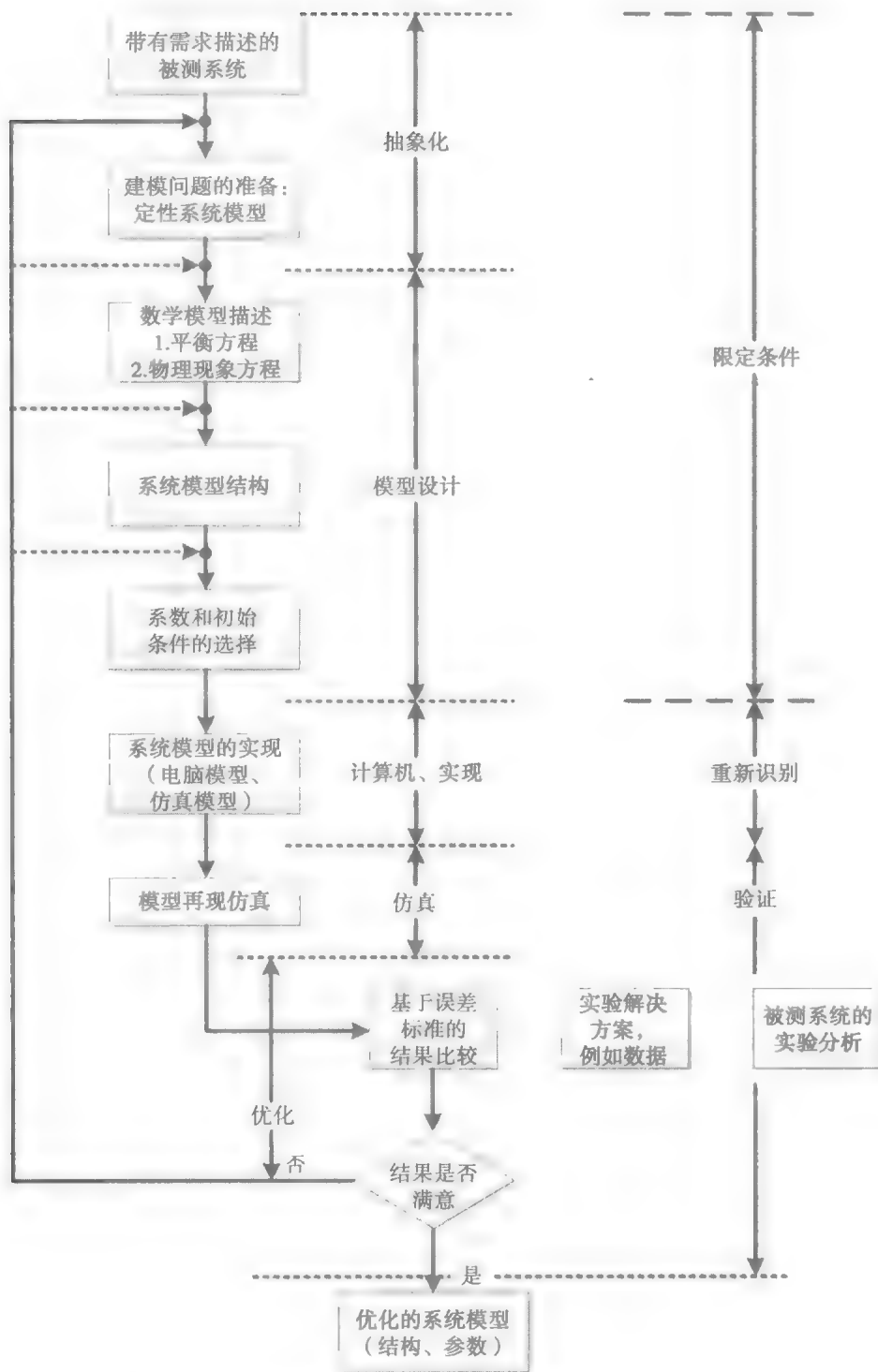


图 1.2 由演绎建模法扩展的经验建模框图 (Möller 2014)

发模型更好的模型 必须提及的是, 系统模型不仅描述了其输入和输出之间的关系, 例如黑盒模型, 还可以了解系统结构以及非黑盒模型各表示层级的内部和内部系统之间的关系。这是由于系统变量之间的关系被映射成适当的数学表达式。例如, 系统输入、输出变量间的关系根据其复杂性, 通过普通微分方程组或者代表系统数学符号的偏微分方程组而描述系统。

在识别出物理或信息物理系统的系统模型之后, 下一步是识别基本关系, 即描述系统的数

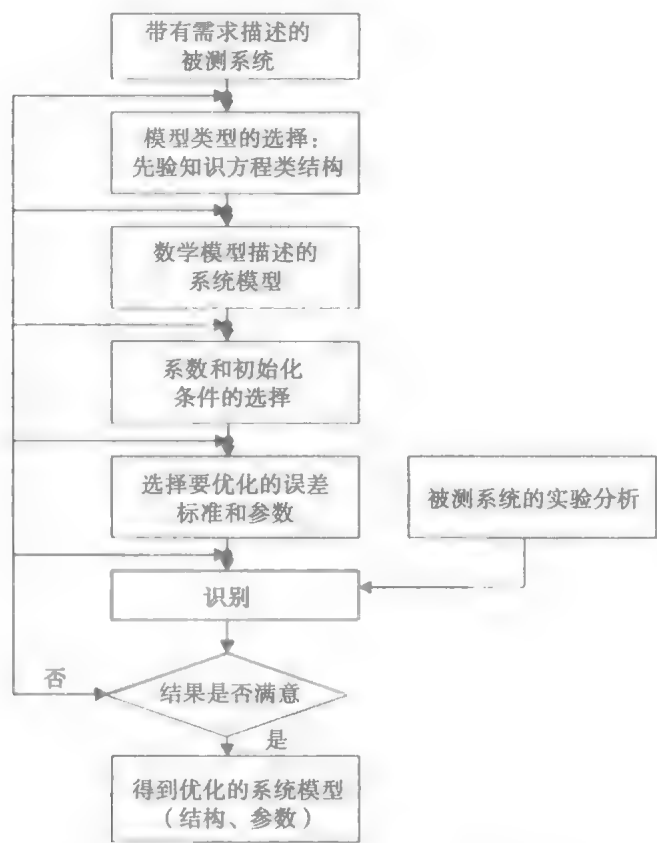


图 1.3 经验建模方法的框图（Müller 2014）

学方程 关于特定领域的物理定律，例如基尔霍夫电压（Kirchhoff's voltage）、电流定律或机械工程中的牛顿定律，可以设置相应的数学方程式。描述系统的方程可以用多种形式表示，例如：

- 线性方程；
- 非线性方程；
- 积分方程；
- 微分方程；
- 差分方程。

根据系统分析的调查重点，在描述同一个系统时，一种形式的数学方程可能比另一种更为可取（Moser 1974） 因此，一个系统可以有多种不同的数学方程形式，物理或信息物理系统可以具有不同的模型。

一旦获得了系统模型的数学描述，下一步是定量或定性地进行系统分析。在定量分析的情况下，重点是确定系统对某些输入和初始条件的确切响应。在定性分析的情况下，重点是确定系统的一般属性，例如：

- 可控性；
- 可识别性；
- 可观测性；
- 稳定性。

因此，定性分析非常重要，因为系统设计往往从这项研究演变而来



下一步是系统设计，通常称为系统工程。它定义了以下要求，并且这些要求是系统设计的先决条件。

- 架构：包含系统特定组件、满足系统功能或目的的行为等的结构；
- 组件：在特定系统中直接或间接相关的部件；
- 数据：抽象概念，信息及其后隐藏的知识可以从中抽象出来；
- 接口：系统的单独组件交换信息的共享边界；
- 模块：与系统的其他组件具有接口的系统的自包含组件。

系统设计也可以作为系统理论在产品开发中的应用。

如果发现设计系统的响应不能令人满意，则必须改进或优化系统。在某些情况下，可以通过调整某些参数来改善或优化系统的响应；在其他情况下，必须重新设计系统组件或模块，以便改进或优化系统性能（Meadows 2009）。

关于系统研究的第一步，应该注意的是，系统设计是在物理或信息物理系统开发的模型上进行的。然而，如果选择了合适的模型，则应通过所需的调整或重新设计来相应地改善物理或信息物理系统的性能。

## 1.2 标准的系统描述形式

系统研究的第二步是建立描述系统行为的数学方程。由于分析方法或目标不同，在描述相同的系统时可以使用不同的数学方程。这些方程属于数学系统表示的两种标准形式：（1）描述系统的外部或输入输出属性的传递函数；（2）描述一个系统内部和输入输出行为的微分方程组，也称为系统的内部或状态变量描述。

### 1.2.1 输入输出描述

系统输入输出描述的概念涉及系统输入和输出之间的数学关系。因此，可以认为输入输出关系是一个多变量系统（MVS），由线性的、具有因果关系的松弛系统的输入输出说明描述，公式如下：

$$Y(t) = \int_{-\infty}^t G(t, \tau) U(\tau) d\tau$$

其中  $U_i$  和  $Y_i$  是输入和输出， $G_i$  是系统的脉冲响应矩阵，可以写为如下形式：

$$G(s) = \frac{Y_i}{U_i}; i = 1, \dots, n$$

如图 1.4 所示，系统有  $n$  个输入和  $m$  个输出。输入由  $u_1, u_2, \dots, u_n$  或  $n \times 1$  列向量  $u = [u_1, u_2, \dots, u_n]'$  表示。输出由  $y_1, y_2, \dots, y_m$  或  $m \times 1$  列向量  $y = [y_1, y_2, \dots, y_m]'$  表示。在一段时间间隔内输入和输出取值为  $(-\infty, \infty)$ 。使用  $u$  或  $u(\cdot)$  表示在  $(-\infty, \infty)$  上定义的向量函数，使用  $u(t)$  表示在时间  $t$  对应的  $u$  值，如果仅通过  $(t_0, t)$  定义函数  $u$ ，则可以表示为  $u(t_0, t)$ 。

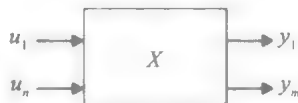


图 1.4  $n$  个输入与  $m$  个输出的系统

如果系统在时间  $t$  的输出仅取决于在时间  $t_1$  的输入，则称为瞬时或零存储系统。仅由电阻器组成的网络就是这样的系统。然而，大多数感兴趣的系统具有存储行为，即时间  $t_1$  的输出不仅取决于在  $t_1$  的输入，而且还取决于在  $t_1$  之前或之后的输入。如果  $u_{(-\infty, t_1]}$  作为系统的输入，则除非我们知道在  $t_1$  前的输入，否则输出  $y_{(t_1, \infty)}$  通常不能确定。使用缺少唯一关系的输入输出描述来确定输入输出描述是没用的。在提供输入之前，必须假定系统是松弛的或静止的，并且输

出由对应的输入单独且唯一确定。如果在  $t = -\infty$  时输入是  $u_{(-\infty, \infty)}$ ，则  $u$  指定独立且唯一的相应输出。因此，在松弛的假定下，可以写出下面的公式：

$$y = Gu$$

其中  $G$  是根据系统的输入  $u$  唯一地指定输出  $y$  的一些操作数或函数。该方程式仅适用于松弛假定条件下的系统。

特别是输入输出表示的松弛系统模型具有定义 1.1 给定的线性特性。

**定义 1.1** 一个松弛系统，对于任何输入  $u^1$  和  $u^2$  以及实数  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$ ，当且仅当符合下式

$$G(\alpha_1 u^1 + \alpha_2 u^2) = \alpha_1 Gu^1 + \alpha_2 Gu^2$$

才称该系统为线性系统。否则，则认为该系统是非线性的。

特别是输入输出表示的松弛系统模型具有定义 1.2 中给出的因果特征。

**定义 1.2** 如果一个松弛系统的输出在  $t$  时不依赖于在时间  $t_1$  之后的输入，则认为它是有因果关系的或非预期的，即它只取决于在时间  $t$  之前以及  $t$  时对应的输入。这意味着过去会影响未来，但不会产生相反的影响。因此，如果松弛系统是因果关系的，其输入和输出关系在  $t$  属于  $(-\infty, \infty)$  时可以写成：

$$y(t) = Gu_{(-\infty, \infty)}$$

如果一个系统不是因果关系的，则认为该系统是非因果的或是可预期的。如果松弛系统是线性的且有因果关系的，则系统的脉冲响应矩阵  $G(t, \tau)$  可以做如下推导。根据定义， $G(t, \tau)$  的每个元素是在时间  $\tau$  对  $\delta$  函数输入的输出。如果松弛系统是有因果关系的，则提供任何输入前，输出都为零。因此，对于线性的、因果关系的松弛系统，对于所有的  $\tau$  以及  $t < \tau$ ，我们有

$$G(t, \tau) = 0$$

因此，线性的有因果关系的松弛系统的输入输出描述变为：

$$Y(t) = \int_{-\infty}^t G(t, \tau) u(\tau) d\tau$$

### 1.2.2 状态变量描述

系统状态的概念是指最小的一组被称为状态变量的变量，该状态变量可完全描述系统及其对任何给定的输入集合的响应。具体来说，状态确定的系统模型具有定义 1.3 中给出的特征。

**定义 1.3** 根据最小变量集  $x_i(t)$ ， $i = 1, \dots, r$ ，以及在初始时间  $t_0$  和时间  $t \geq t_0$  的系统输入的变量的知识，一个系统的数学描述足以预测所有时间  $t > t_0$  的未来系统状态和输出。

该定义声明，状态确定系统的动态行为完全由  $r$  个变量集  $x_i(t)$  的响应表征，其中数字  $r$  定义为系统的顺序。

如果系统是状态确定的，其状态变量  $(x_1(t_0), x_2(t_0), \dots, x_r(t_0))$ ，对于  $t \geq t_0$ ， $n = r$  的输入  $u_1(t), \dots, u_n(t)$  足以确定系统的所有未来行为。

状态变量是系统在任何时间  $t$  时完全表征系统状态的内部描述，并从中可计算任何输出变量  $y_m(t)$  (Rockwell 2010)。

在整个系统分析中使用的状态方程式的标准形式可以表示为一组  $n$  耦合的一阶常微分方程，其中每个状态变量的时间导数以状态变量  $x_1(t), x_2(t), \dots, x_r(t)$  和系统输入  $u_1(t), \dots, u_n(t)$  表示。

一般来说， $n$  个状态方程的形式是

$$\dot{x}_1 = f_1(x, u, t)$$

$$\dot{x}_2 = f_2(x, u, t)$$

...

$$\dot{x}_i = f_i(x, u, t)$$

其中  $\dot{x}_i = \frac{dx_i}{dt}$  和函数  $f_i(x, u, t)$ ,  $i = 1, \dots, r$  是状态变量、系统输入和时间的一般非线性时变函数。

常用向量形式表达状态方程, 其中  $r$  个状态变量的集合可写为状态向量:

$$x(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_r(t)]^T$$

并且  $m$  个输入的集合可以写为一个输入向量:

$$u(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_m(t)]^T$$

每个状态变量是列向量  $x(t)$  的时变分量。状态方程的这种形式明确地表示了状态确定系统的定义中包含的基本要素。对于一组初始条件 ( $x_i (i = 1, \dots, r)$  在某个时间  $t_0$  的值) 和  $t \geq t_0$  时的输入, 状态方程明确地指定所有状态变量的导数, 然后通过直接集成找到每个状态变量在某个时间  $\Delta t$  后的值 (Rockwell 2010)。

任何时刻的系统状态可以解释为  $r$  维状态空间中的一个点, 并且动态状态对应的  $x(t)$  可以解释为在状态空间中追踪出的路径或轨迹。

描述输入、输出和状态之间的唯一关系的方程状态称为动态方程, 其保持状态方程的形式:

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t)$$

输出方程如下:

$$y(t) = g(x(t), u(t), t)$$

或者更具体地表示为:

$$\dot{x}_1(t) = f_1(x_1(t), x_2(t), \dots, x_r(t), u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t), t)$$

$$\dot{x}_2(t) = f_2(x_1(t), x_2(t), \dots, x_r(t), u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t), t)$$

$$\dot{x}_r(t) = f_r(x_1(t), x_2(t), \dots, x_r(t), u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t), t)$$

$$\dot{y}_1(t) = f_1(x_1(t), x_2(t), \dots, x_r(t), u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t), t)$$

$$\dot{y}_2(t) = f_2(x_1(t), x_2(t), \dots, x_r(t), u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t), t)$$

$$\dot{y}_m(t) = f_m(x_1(t), x_2(t), \dots, x_r(t), u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t), t)$$

其中  $x = [x_1, x_2, \dots, x_r]'$  表示状态,  $y = [y_1, y_2, \dots, y_m]'$  表示输出,  $u = [u_1, u_2, \dots, u_n]'$  是输入。输入  $u$ 、输出  $y$  和状态  $x$  是实数向量函数,  $t$  定义在  $[-\infty, \infty]$  之上。不明确的状态和输出方程是  $x$  和  $u$  的线性函数。很容易表明, 如果  $f$  和  $g$  是  $x$  和  $u$  的线性函数, 则它们的形式是:

$$f(x(t), u(t), t) = A(t)x(t) + B(t)u(t)$$

$$g(x(t), u(t), t) = C(t)x(t) + D(t)u(t)$$

其中  $A$ 、 $B$ 、 $C$  和  $D$  分别为  $n \times n$ 、 $n \times p$ 、 $q \times n$  和  $q \times p$  矩阵。此后,  $n$  维线性动态方程的形式为:

$$\dot{x} = A(t)x + B(t)u \quad (\text{状态方程})$$

$$y = C(t)x + D(t)u \quad (\text{输出方程})$$

对于这个方程有一个唯一的解, 每个  $A(\cdot)$  必须是在  $[-\infty, \infty]$  上定义的  $t$  的连续函数。方便起见, 也假设  $B$ 、 $C$  和  $D$  为在  $[-\infty, \infty]$  中定义的连续函数。由于值  $A$ 、 $B$ 、 $C$  和  $D$

随时间而变化，因此动态方程更精确地称为线性的时变动态方程。如果值  $A$ 、 $B$ 、 $C$  和  $D$  与时间  $t$  无关，则动态方程更精确地称为线性非时变动态方程。因此， $n$  维线性非时变动态方程的形式是：

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du\end{aligned}$$

其中  $A$ 、 $B$ 、 $C$  和  $D$  分别为  $n \times n$ 、 $n \times p$ 、 $q \times n$  和  $q \times p$  实数常量矩阵。在非时变的情况中，方程的特征不随时间变化；因此，选择初始时间  $t_0$  为 0 时便不会失去通用性。那么我们感兴趣的时间范围将为  $(0, \infty)$ 。

物理世界中的许多系统是振荡系统，可以使能量从一种形式转换到另一种形式。在摆锤中，当锤从最高位置摆动到中间位置时，重力场中的摆锤的势能转换成动能。电气 RCI 网络允许在组件之间改变能量，并可能导致振荡。如果没有发生能量损失，则振荡以恒定幅度继续；然而，大多数现实世界的系统都会失去能量，即振荡会由于阻尼最终停止。一个简单的振荡系统，例如简单摆，可以用以下二阶非线性微分方程的形式来描述：

$$x'' = \frac{dx'}{dt} = k \cdot F(x) \cdot x' - x$$

13

其中  $x''$  是位移的加速度， $x'$  是位移随时间变化的速率， $x$  是位移， $k$  是阻尼项。 $F(x)$  是  $x$  的代数函数，它控制振荡的性质。

对于微分方程的第二项  $(-x)$ ，当不占主导地位时，会使振荡物体朝向中点加速。当荷兰物理学家范德波尔 (van der Pol) 在研究如何维持依赖于连续振荡的电路中的振荡时，提出了  $F(x)$  的特殊形式。当  $|x| < 1.0$  时，维持振荡系统的能量方程为正，当  $|x| > 1.0$  时，能量方程为负。因此，范德波尔振荡器的二阶微分方程可以写为：

$$x'' + k \cdot (x^2 - 1)x' + x = 0$$

或者，可以通过利用如下两组两个一阶微分方程来描述范德波尔振荡器，其解决方案可以通过模拟获得：

$$\begin{aligned}x &= x_1 \\ x' &= x'_1 = x_2 \\ x'' &= x'_2\end{aligned}$$

这导致了

$$x_2 = -k(x_1^2 - 1)x_2 - x_1$$

或者

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} - k \begin{bmatrix} x_2 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1^2 \\ x_2^2 \end{bmatrix}$$

状态向量  $x(t)$  定义为状态变量的最小集合，其唯一地确定动态系统的未来状态（如果给出了其当前值）。因此，如果  $x(t_0)$ ， $t = t_0$  时的状态是已知的，则对于  $t > t_0$ ，任何未来时间  $x(t)$  的状态向量将由微分方程唯一地确定：

$$x' = A(t)x + B(t)u; \quad t > 0$$

该方程可以以矩阵的形式更为紧凑地写为：

$$x' = Ax + Bu$$

在状态向量形式中， $x$  作为状态向量， $u$  作为源或输入向量， $A$  和  $B$  作为相应的系统和输入矩阵。

我们可以写一个输出向量，使输出变量作为状态变量和输入的线性组合。输出向量的一般



形式为:

$$y = Cx + Du$$

其中  $C$  是输出矩阵,  $D$  是转换矩阵。

上述讨论了时变案例中的状态变量描述。因此, 相应的非时变向量矩阵符号如下:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du$$

通过使用上述等式的拉普拉斯变换, 并将所有初始条件设置为零, 可以得到:

$$sX(s) = A \cdot X(s) + B \cdot U(s)$$

$$Y(s) = C \cdot X(s) + D \cdot U(s)$$

求解上方第一个方程中的  $X(s)$  并将其代入上方的第二个方程, 得出:

$$Y(s) = [C(sI - A)^{-1}B + D]U(s) = G(s)U(s)$$

其中  $G(s)$  是  $n \times m$  的系统传递矩阵。对于单输入单输出系统 (即所谓的 SISO 系统), 上述方程式中的系统矩阵成为系统传递函数的一种形式:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = c^T(sI - A)^{-1}b + dc$$



图 1.5 SISO 系统的传输特性

如图 1.5 所示。

**示例 1.1** 假设线性系统的传递矩阵可以描述为:

$$x'_1 = x_2$$

$$x'_2 = x_3$$

$$x'_3 = -2x_1 - 4x_2 - 6x_3 + u(t)$$

$$y = x_1 + x_2 + u(t)$$

计算  $(sI - A)^{-1}$  如下:

$$(sI - A)^{-1} = \left[ \begin{pmatrix} s & 0 & 0 \\ 0 & s & 0 \\ 0 & 0 & s \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -2 & -4 & -6 \end{pmatrix} \right]^{-1} = \begin{pmatrix} s & -1 & 0 \\ 0 & s & 0 \\ 2 & 4 & s+6 \end{pmatrix}^{-1}$$

重写这个方程, 得到如下形式:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}^T (sI - A)^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + 1$$

系统由一阶微分方程组定义。为了证明一阶微分方程解的存在和唯一性, 我们为此介绍了一个系统的证明过程。

**定义 1.4** 当且仅当  $\text{rank}[A] = \text{rank}[Ab]$ , 具有  $m$  个方程和  $n$  个未知数的方程组  $Ax = b$  才有解。令  $r = \text{rank}[A]$ 。如果满足条件  $\text{rank}[A] = \text{rank}[Ab]$ , 并且  $r = n$ , 则解是唯一的。 ■

**定义 1.5** 当且仅当  $\text{rank}[A] = \text{rank}[Ab]$ , 具有  $m$  个方程和  $n$  个未知数的方程组  $Ax = b$  才有解。令  $r = \text{rank}[A]$ 。如果满足条件  $\text{rank}[A] = \text{rank}[Ab]$ , 并且  $r < n$ , 则存在无数个解, 并且  $r$  未知变量可以表示为值为任意的其他  $n - r$  个未知变量的线性组合。 ■

解的存在和唯一性的证明要求一种形式的增广矩阵  $[Ab]$ , 该增广矩阵的前  $n$  列是  $A$  的列, 最后一列是列向量  $b$ 。

确定以下式子是否具有唯一的解:

$$\begin{aligned} 6x + 3y + 2z &= 18 \\ -6x + 3y + 4z &= 12 \end{aligned}$$

$$6x + 3y + 4z = 24$$

矩阵  $A$ 、 $b$  和  $v$  是：

$$A = \begin{bmatrix} 6 & 3 & 2 \\ -6 & 3 & 4 \\ 6 & 3 & 4 \end{bmatrix}$$
$$b = \begin{bmatrix} 18 \\ 12 \\ 24 \end{bmatrix}$$
$$[Ab] = \begin{bmatrix} 6 & 3 & 2 & 18 \\ -6 & 3 & 4 & 12 \\ 6 & 3 & 4 & 24 \end{bmatrix}$$
$$v = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

16

显然，从定义 1.4 和定义 1.5 中，必须证明  $A$  和  $[Ab]$  等秩。 $\text{rank}[A] = 3$ ， $\text{rank}[Ab] = 3$ 。因为  $A$  和  $[Ab]$  具有相同的秩，所以存在一个解。该秩是未知数，解为唯一， $x = 1$ ， $y = 2$ ， $z = 3$ 。

1.3 可控性、可观测性和可识别性

分析和设计物理和信息物理系统需要先验知识判断是否可以将被分析或设计的系统视为可控的、可观测的和可识别的。可控性、可观测性和可识别性是在状态变量符号中描述的系统的重要特性。关于这种分析，当系统输入  $u$  可以用于在有限时间内将系统从任何初始状态转移到任意状态时，则称线性系统为状态可控的。此外，如果对于任何  $t_1 > t_0$  和  $t_0 \leq t \leq t_1$  的给定输出  $y(t)$  可以唯一地确定初始状态  $x(t_0)$ ，则可以说线性系统是可观测的。如果一个系统的数学模型可以用状态符号表示，则可控性、可观测性和可识别性分析的方法可用于模型预测。

从更一般的观点来看，可以对如下的时变情况给出对可控性的描述。

定义 1.6 线性动态系统：

$$x' = Ax + Bu$$
$$y = Cx + Du$$

- 如果对于有限的  $t_1 > t_0$ ，存在  $t_1 \in T$ ，则系统在时间  $t_0 \in T$  可控；
- 如果每个  $t_0 \in T$ ，有限时间  $t_1 > t_0$ ，存在  $t_1 \in T$ ，则系统完全可控；
- 如果对于每个  $t_0 \in T$  和每个有限的  $t_1 > t_0$ ， $t_1 \in T$ ，则系统是微分的或部分可控的，矩阵

17

$$w(t_0, t_1) = \int_{t_0}^{t_1} \Phi(t_0, \tau) B(\tau) B^T(\tau) \Phi^T(t_0, \tau) d\tau$$

是规则的。

可控性的不同符号代表系统的不同特征。由于具有可控性，相应的数学系统模型具有与现实世界系统本身相同的结果。

系统可控性分析中的一项重要任务是确定一个系统特性，该系统特性可以允许系统对于不同场景的行为方式进行预测。

定义 1.7 如果在有限区间  $t_0 \leq t \leq t_f$  中，存在控制信号  $u$ ，则认为线性动态系统是完全状态可控的，它将系统从任何初始状态  $x(t_0) = x_0$  转换到任何所需的最终状态  $x(t_f) = x_f$ 。线性动态系统如下：

$$\dot{x}' = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du$$

定义 1.7 是真的, 当且仅当  $(n, np)$  可控性矩阵

$$Q_c := [B \quad AB \quad A^2B \quad \cdots \quad A^{n-1}B]$$

具有完全的行秩  $n$ , 这意味着  $Q_c$  的向量元素  $B, AB, \cdots, A^{n-1}B$  是线性独立的, 可控性矩阵  $Q_c$  也是一个非零行列式。

**示例 1.2** 动态系统可以由状态方程模型描述:

$$\dot{x}'(t) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t) = \begin{bmatrix} -3 & 1 \\ -2 & 1.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} [u]$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} -3 & 1 \\ -2 & 1.5 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

如果  $B$  和  $AB$  是线性独立的, 并且可控性矩阵  $Q_c := [B, AB] = 2$ , 则示例 1.2 中给出的动态系统是\*\*完全状态可控的\*\*, 这里

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, AB = \begin{bmatrix} 1.0 \\ 1.5 \end{bmatrix}$$

因此

$$Q_c := [B, AB] = 2$$

这意味着动态系统是\*\*完全可控的\*\*。

**示例 1.3** 假设动态系统可以用拉普拉斯域符号描述:

$$X_1 = \frac{1}{s+1} \cdot U'$$

$$X_2 = \frac{1}{s+1} \cdot (X_1 + U)$$

其以状态方程式重写为:

$$\dot{x}'_1 = -x_1 + u$$

$$\dot{x}'_2 = x_1 - 2 \cdot x_2 + u$$

假设

$$b = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}, Ab = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 1 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ -1 \end{bmatrix}$$

上面给出的动态系统不是状态可控的, 而  $b + Ab = 0$ , 这意味着向量  $b$  和  $Ab$  是线性相关的。

**定义 1.8** 线性动态系统

$$\dot{x}' = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du$$

具有以下属性:

- 如果对于有限时间  $t_1 > t_0$ , 存在  $t_1 \in T$ , 则系统在时间  $t_0 \in T$  可观测;
- 如果对于每个  $t_0 \in T$  和每个有限时间  $t_1 > t_0$ , 存在  $t_1 \in T$ , 则系统在所有时间完全可观测;
- 如果对于每个  $t_0 \in T$  和每个有限时间  $t_1 > t_0$ ,  $t_1 \in T$ , 则系统是微分的或部分可观测的, 而矩阵

$$m(t_0, t_1) = \int_{t_0}^{t_1} \Phi^T(t_0, \tau) C^T(\tau) C(\tau) \Phi(t_0, \tau) d\tau$$

是规则的。

可观测性的不同观点来源于动态系统的属性，而不是源自数学模型的属性。但作为动态系统，由于其可观测性，数学模型具有相同的结果。

下面我们来看一下系统是完全可观测的；因此，对其预测是有可能的，我们可以写：

**定义 1.9** 线性动态系统

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du$$

如果从同一间隔观测到的输出  $y$  可以确定任何初始状态  $x(t_0) = x_0$ ，则可以说在有限区间  $t_0 < t < t_f$  内完全可观测。

当且仅当  $(n, nr)$  可观测矩阵

$$Q_0 = [C^T C T A^T \cdots C^T (A^T)^{n-1}]$$

具有满秩  $n$ ， $C^T$  为  $C$  的转置，则定义 1.9 为真。

**示例 1.4** 时变情况下，动态系统的状态变量描述如下：

$$\dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t)$$

$$y(t) = C \cdot x(t)$$

20

对应的参数为

$$\frac{d}{dt}x = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -6 & -11 & 6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} [u]$$

$$y(t) = [20 \quad 9 \quad 1] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -6 & -11 & 6 \end{bmatrix}$$

$$C = [20 \quad 9 \quad 1]$$

或

$$C^T = \begin{bmatrix} 20 \\ 9 \\ 1 \end{bmatrix}$$

则

$$C^T A^T = \begin{bmatrix} 20 \\ 9 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & -6 \\ 1 & 0 & -11 \\ 0 & 1 & -6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -6 \\ 9 \\ 3 \end{bmatrix}$$

$$C^T (A^T)^2 = \begin{bmatrix} 20 \\ 9 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -6 & 36 \\ 0 & -11 & 60 \\ 1 & -6 & 25 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -18 \\ -39 \\ -9 \end{bmatrix}$$

向量  $C^T$ 、 $C^T A^T$  和  $C^T (A^T)^2$  是线性独立的, 可观测矩阵的秩为

$$Q_0 := [C^T, C^T A^T, C^T (A^T)^2] = 3$$

因此, 示例 1.4 中给出的动态系统是完全可观测的。

**示例 1.5** 假设输出方程为

$$y(t) = [4 \ 5 \ 1][x_1, x_2, x_3]^T$$

代替

$$y(t) = [20 \ 9 \ 1][x_1, x_2, x_3]^T$$

向量  $C^T$ 、 $C^T A^T$  和  $C^T (A^T)^2$  是线性相关的, 可观测矩阵的秩具有以下值:

$$Q_0 := [C^T, C^T A^T, C^T (A^T)^2] = 2$$

因此, 动态系统是不可观测的。

**定义 1.10** 如果在  $t_0 < t < t_f$  上观察到的参数向量  $\Theta$  可以从输出  $y$  中确定, 则在相同时间间隔  $t_0 < t < t_f$  内, 动态系统对于其参数称为可识别的。

**定义 1.11** 对于真正的模型参数矢量  $\Theta_T$ , 一个动态系统是:

- (1) 如果存在输入序列  $\{u\}$ , 对于所有  $\Theta \neq \Theta_T$ ,  $\Theta$  和  $\Theta_T$  是可区分的, 则参数可识别的;
- (2) 如果存在输入序列  $\{u\}$ , 对于所有  $\Theta \neq \Theta_T$ ,  $\Theta$  和  $\Theta_T$  是可区分的, 但为有限集, 则系统可识别;
- (3) 在所有其他情况下无法识别。

动态系统的状态变量概念完全表征了系统的过去, 因为过去的输入不需要确定动态系统的未来输出。状态方程的这个基本符号在系统状态变量方法中是非常重要的。事实上, 描述动态系统的这种数学符号基本上基于状态变量的概念。

根据用于描述系统的方程的具体形式, 状态方程可以是几种数学形式之一, 并可以根据它们的数学结构对状态方程进行分类。

时间通常是状态变量模型中的一个独立变量:

- 有时, 时间变量作为离散变量; 在这种情况下, 状态变量模型通常将由递归方程描述;
- 在其他情况下, 独立变量时间作为实际值;
- 在状态变量模型中附加自变量的情况下, 它们被分配; 这种状态变量模型由偏微分方程描述;
- 如果时间是唯一的独立变量, 那么就认为状态变量模型是集成的。实际的物理量将不会真正作为一种度量的衡量标准。此外, 必须考虑到时间是经常可用于区分集中和分散的元素。
- 状态方程模型可以包括随机效应, 在这种情况下, 认为状态方程模型是随机的;
- 如果不包括这些特征, 则认为状态方程模型是确定性的。

## 1.4 线性系统模型的分析方案

线性系统模型的分析方案需要检查其对输入需求的系统响应行为。令向量矩阵符号方式的状态变量方程式产生一个对角矩阵  $A$

$$x' = Ax + bu \quad (1.1)$$

$$y = c^T x \quad (1.2)$$

能很简单地求解  $x_i(t)$ , 其中  $i=1, 2, \dots, n$ 。考虑一个  $u=0$  的线性系统, 描述为:

$$x' = Ax \quad (1.3)$$

式 (1.3) 的时间解形式为



$$x(t) = \Phi(t, t_0)x(t_0)$$

其中  $\Phi(t, t_0)$  称为状态转换矩阵。初始条件  $x(t_0)$  通过矩阵  $\Phi(t, t_0)$  转移到时间相关的状态  $x$ 。由于在  $t = t_0$  时  $x(t)$  的状态为  $x(t_0)$ ,  $\Phi(t, t_0) = I$  显然为单位矩阵。状态转换矩阵的转换特性可以写成:

$$\Phi(t_2, t_0) = \Phi(t_2, t_1)\Phi(t_1, t_0) \quad (1.4)$$

这表示如果初始状态向量  $x(t_0)$  通过  $\Phi(t_1, t_0)$  转移到  $x(t_1)$ , 并且如果  $x(t_1)$  通过  $\Phi(t_2, t_1)$  转移到  $x(t_2)$ , 那么  $x(t_0)$  可以直接通过  $\Phi(t_2, t_0)$  转变为  $x(t_2)$ , 它是两个状态转换矩阵的乘积。如果式 (1.3) 中的矩阵  $A$  随时间恒定, 则状态转换矩阵  $\Phi(t, t_0)$  仅为距离  $t$  和  $t_0$  的函数, 即

$$\Phi(t, t_1) = \Phi(t - t_0) \quad (1.5)$$

考虑到线性动力系统的矩阵指数, 如式 (1.3) 所示, 产生

$$x(t) = e^{At}x(0) \quad (1.6)$$

这显然意味着如果如下所示使用矩阵微分规则, 则动态系统的时间响应等于指数函数:

$$x' = \frac{d}{dt}[x(t)] = \frac{d}{dt}[e^{At} \cdot x(0)] = A \cdot e^{At} \cdot x(0) \quad (1.7)$$

将式 (1.6) 代入式 (1.7) 得到  $x' = Ax$ 。比较式 (1.6) 和式 (1.3) 得到:

$$\Phi(t) = e^{At} \quad (1.8)$$

我们现在可以用  $t=0$  的泰勒级数表达术语  $e^{At}$ :

$$\Phi(t) = e^{At} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} A^k t^k = I + A \cdot t + \frac{1}{2!} A^2 \cdot t^2 + \dots \quad (1.9)$$

这是通过串联扩展求解状态转换方程的方程式。

此外, 我们可以通过如下的指数表达式来推断状态变量 (式 (1.3)) 的每个项:

$$x'(t)e^{-At} = A \cdot x(t) \cdot e^{-At} + B \cdot u(t) \cdot e^{-At} \quad (1.10)$$

也就是说, 删除用于时间依赖的显式符号, 并重新排列方程式得:

$$x'e^{-At} - A \cdot x \cdot e^{-At} = B \cdot u \cdot e^{-At} \quad (1.11)$$

或者

$$\frac{d}{dt}(e^{-At}x) = B \cdot u \cdot e^{-At} \quad (1.12)$$

通过将  $dt$  乘以在时间间隔  $t_0$  到  $t$  的积分, 以及改变变量, 我们可以写成:

$$\int_{t_0}^t d/d\tau(e^{-A\tau}x) d\tau = \int_{t_0}^t B \cdot u(\tau) \cdot e^{-A\tau} d\tau \quad (1.13)$$

或

$$x(t) \cdot e^{-At} - x(t_0) \cdot e^{-At_0} = \int_{t_0}^t B \cdot u(\tau) \cdot e^{-A\tau} d\tau \quad (1.14)$$

在这个方程式中左乘所有项:

$$x(t) = x(t_0) \cdot e^{-A(t-t_0)} + \int_{t_0}^t B \cdot u(\tau) \cdot e^{-A(t-\tau)} d\tau \quad (1.15)$$

也就是说, 根据状态转换矩阵重写为:

$$x(t) = x(t_0) \cdot \Phi(t - t_0) = \int_{t_0}^t B \cdot u(\tau) \Phi(t - \tau) d\tau \quad (1.16)$$

这是卷积积分的矩阵形式。式 (1.16) 中的卷积积分涉及脉冲响应函数和状态转换矩阵的叠加积分。

### 1.4.1 使用拉普拉斯变换的状态方程的解

状态转换矩阵用于产生线性状态变量方程的完整解。让线性状态微分方程系统的时间依赖行为用符号表示:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (1.17)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (1.18)$$

这意味着假设输出向量  $y(t)$  与输入向量  $u(t)$  与系统矩阵  $A$  和输入矩阵  $B$  的相关性为常数矩阵。为了确定该状态微分方程的解,可以使用如下拉普拉斯变换  $L[f(t)] = F(s)$ :

$$s \cdot X(s) = A \cdot X(s) + X(0) + B \cdot U(s) \quad (1.19)$$

其中  $X(0)$  表示初始状态向量,其可能是已知数,  $s$  表示拉普拉斯算子,它是一阶导数。求解式 (1.19) 得出:

$$X(s) = (sI - A)^{-1}X(0) + (sI - A)^{-1}BU(s) \quad (1.20)$$

其中  $X(s)$  作为  $x(t)$  的拉普拉斯变换,  $I$  为由  $AI = IA = A$  定义的  $(n, n)$  单位矩阵,即:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \quad (1.21)$$

使用  $A^{-1}$  作为  $A$  的逆矩阵,即  $AA^{-1} = A^{-1}A = I$  和  $(sI - A)$  作为特征矩阵,给出

$$(sI - A)X(s) = X(0) + B \cdot U(s) \quad (1.22)$$

其中  $L(s) = (sI - A)$  和  $L^{-1}(s) = (sI - A)^{-1}$ ,  $L(s)$  是伴随特征矩阵以及  $\Delta(s)$  称为矩阵  $A$  的特征多项式,我们可以写成:

$$L^{-1}(s) = (sI - A)^{-1} = \frac{1}{\Delta(s)} \cdot I(s) \quad (1.23)$$

上述多项式的根称为动态系统的特征值。对于具有常数系数的线性动态系统,它们是简单的关系。

显然,可以通过式 (1.23) 的拉普拉斯变换 (式 (1.20)) 逆卷积获得时域解,即:

$$X(s) = \frac{1}{\Delta(s)} \cdot L(s) \cdot X(0) + \frac{1}{\Delta(s)} \cdot L(s) \cdot U(s) \quad (1.24)$$

对于普通微分方程,我们可以将  $X(s)$  扩展为部分分数:

$$X(s) = X_1(s) \cdot \frac{1}{s - s_1} + X_2(s) \cdot \frac{1}{s - s_1} + \dots \quad (1.25)$$

解的专业形式为:

$$X(s)_i = L(s) \cdot X(0) + L(s) \cdot U(s) = X_i + U_i$$

和相应的结果:

$$X_1 = \lim_{s \rightarrow s_1} \left\{ L(s) \cdot \frac{1}{[(s - s_2)(s - s_3) \dots]} \right\} \cdot X(0) \quad (1.26)$$

$$\Rightarrow X_1 = \left\{ L(s) \cdot \frac{1}{[(s_1 - s_2)(s_1 - s_3) \dots]} \right\} \cdot X(0) \quad (1.27)$$

$$X_2 = \lim_{s \rightarrow s_2} \left\{ L(s) \cdot \frac{1}{[(s - s_1)(s - s_3) \dots]} \right\} \cdot X(0) \quad (1.28)$$

$$\Rightarrow X_2 = \left\{ L(s_2) \cdot \frac{1}{[(s_2 - s_1)(s_2 - s_3) \dots]} \right\} \cdot X(0) \quad (1.29)$$

然后  $X_i$  为:

25

26

$$X_i = \lim_{s \rightarrow s_i} \left[ \frac{(s - s_i)}{\Delta(s)} \right] \cdot L(s) \cdot X(0)$$

$$i = 1, 2, \dots, n \quad (1.30)$$

作为  $L(s)U(s) \frac{1}{\Delta(s)}$  的每个根 得到的状态向量  $x(t)$  可以写为

$$x(t) = X_1 e_1'' + X_2 e_2'' + \dots + X_n e_n'' + U_1 e_1'' + \dots + U_m e_m''$$

因此, 我们可以使用拉普拉斯变换来写出完整的解  $X(t)$ :

$$X(t) = L^{-1} \{ (sI - A)^{-1} \} X(0) + L^{-1} \{ (sI - A)^{-1} B \cdot U(s) \} \quad (1.31)$$

使用符号:

$$X(t) = L^{-1} \{ (sI - A)^{-1} \} X(0) = e^{At} \quad (1.32)$$

以及拉普拉斯变换的对应关系:

$$\Phi(t) = L^{-1} \{ (sI - A)^{-1} \} X(0) = e^{At} \quad (1.33)$$

我们获得线性系统的状态转换矩阵 转换矩阵确定动态系统在  $t_0$  和  $t_i$  之间的所有时间的瞬态行为:

$$\Phi(t) = e^{At} \quad (1.34)$$

假设初始时间表示为  $t = t_0$  而不是  $t = 0$ , 我们可以写出:

$$x(t) = x(t_0) e^{A(t-t_0)} \quad (1.35)$$

以及

$$x(t) = x(0) \Phi(t - t_0) \quad (1.36)$$

### 1.4.2 线性向量方程组的特征值

考虑到式 (1.3) 中描述的具有  $u=0$  的线性系统, 具有形式

$$x' = A \cdot x \quad (1.37) \quad [27]$$

其中  $A$  表示  $n \times n$  矩阵 使用拉普拉斯变换并求解  $X(s)$ , 我们得到:

$$sX(s) = A \cdot X(s) \quad (1.38)$$

$$0 = (A - sI)X(s) \quad (1.39)$$

其中  $s$  是标量。标量  $s$  称为  $A$  的特征值, 向量  $X(s)$  称为  $A$  的特征向量 所有特征值的完整集合称为  $A$  的谱。式 (1.39) 对于非平凡的  $X(s)$  产生特征方程:

$$\det(A - sI) = 0 \quad (1.40)$$

其中  $\det(A - sI)$  作为  $A$  的特征多项式 它是  $s$  中的第  $n$  次多项式 特征方程由下式给出:

$$\det(A - sI) = \begin{vmatrix} a_{11} - s & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} - s \end{vmatrix} \quad (1.41)$$

$$= (-1)^n (s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-2} s^2 + a_{n-1} s + a_n) = 0 \quad (1.42)$$

式 (1.41) 中的特征的  $n$  个根是所谓的  $A$  的特征值, 称为特征根 注意, 真正的  $n \times n$  矩阵  $A$  不一定具有真实的特征值 但是由于  $\det(A - sI) = 0$  是具有实数系数的多项式, 因此任何复特征值必须出现在共轭对中; 即如果  $\alpha + j\beta$  是特征值, 则  $\alpha - j\beta$  是  $A$  的特征值

**示例 1.6** 假设系统可以以系统矩阵  $A$  描述为:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & -1 \\ 1 & 3 & 2 \\ 2 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (1.43)$$

关于其拉普拉斯变换，我们可以写为：

$$L(sI - A) = \begin{bmatrix} s-1 & -2 & 1 \\ -1 & s-3 & -2 \\ -2 & 1 & s \end{bmatrix} \quad (1.44)$$

因此，我们发现  $A$  的特征值如下：

$$\begin{aligned} \Delta(s) &= (s-1)(s-3)s - 8 - 1 + 2(s-3) - 2s + 2(s-1) \\ &= s^3 - 4s^2 + 5s - 17 \end{aligned} \quad (1.45)$$

可以重写为：

$$L^{-1}(s) = \frac{1}{\Delta(s)} \cdot L(s) \quad (1.46)$$

**示例 1.7** 考虑由微分方程系统描述的线性系统：

$$x'_1 = -k_1 x_1 + u \quad (1.47)$$

和

$$x'_2 = k_1 x_1 - k_2 x_2 \quad (1.48)$$

如果系统矩阵  $A$  具有以下形式：

$$A = \begin{bmatrix} -k_1 & 0 \\ k_1 & -k_2 \end{bmatrix} \quad (1.49)$$

那么  $A$  的特征值可以计算如下：

$$\det(A - \lambda I) = 0 \quad (1.50)$$

$$\det \begin{bmatrix} -k_1 - \lambda & 0 \\ k_1 & -k_2 - \lambda \end{bmatrix} = (-k_1 - \lambda)(-k_2 - \lambda) = 0 \quad (1.51)$$

可以认为其特征值是  $\lambda_1 = -k_1$  和  $\lambda_2 = -k_2$ 。

## 1.5 系统稳态误差

稳态误差是当所有瞬态衰减时输出响应和输入信号之间的差异。为了确定稳态误差，有必要知道输入信号的特性，但通常输入不是提前知道的。例如，如果输入相对于时间以随机形式变化，则属于这种情况。例如，对于无人机控制系统，如果目标系统正在操纵以逃避攻击无人机，无人机目标的速度和方向则可能变得不可预知。因此，可以说，没有一个单一的数学表达式可以适用于无人机控制系统的输入可以改变的所有不同方式。因此，可以说，没有一个单一的数学表达式可以适用于所有不同的无人机控制系统输入变化方式。因此，在无人驾驶控制器设计的情况下，设计者可以根据控制系统的设计，尝试通过特定方式改变的测试信号来克服随机影响。不考虑输入信号的单位，通常使用的测试信号（例如单位阶跃响应、斜坡变化（详见 1.1 节）和抛物面变化）可用于研究系统的稳态误差特性。因此，通过研究系统对这些类型的输入信号的响应所获得的信息，可以用于在遇到更多分散输入时预测系统性能。

我们考虑一个单位反馈系统，误差  $e(t)$  是输入  $u(t)$  和输出  $y(t)$  信号之间的差值，如图 1.6 所示。

令输入为  $u(t)$ ，输出为  $y(t)$ ；那么假设存在稳态条件，则  $y(t)$  最终可以适应于稳态形式的行为。如果在这个阶段， $y(t)$  不等于  $u(t)$ ，即  $y(t) \neq u(t)$ ；则所得到的误差  $e(t)$  称为稳态误差：

$$e(t) = u(t) - y(t)$$

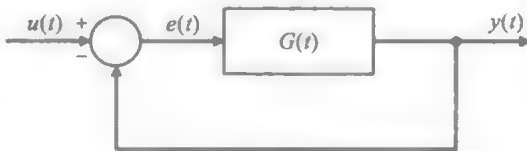


图 1.6 单元反馈控制系统（详见正文）

系统稳态误差可以分为三类（McDonalds and Lowe 1975）。

- 零误差：输出跟随输入，无误差；
- 有限和恒定误差：输出跟随具有一定固定幅度误差的输入；
- 无限误差：输出随着误差的不断增加而偏离输入，这意味着系统不能遵循输入。

当  $t$  足够大以致所有系统瞬态衰减时，稳态误差是  $e(t)$  的值。稳态误差由以下表达式定义：

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [e(t)] = \lim_{s \rightarrow 0} [se(s)] \tag{1.52}$$

其中  $e(s)$  是  $e(t)$  的拉普拉斯变换。如果存在  $e(s)$  的表达式，则可以容易地确定  $e(t)$ ，而不评估系统响应。

图 1.7 显示了典型控制系统的一般形式的框图，其中在如下形式中给出  $e(s)$ ：

$$e(s) = u(s) - H(s)y(s) = u(s) - H(s)G(s)e(s)$$

因此，

$$e(s) [1 + H(s)G(s)] = u(s)$$

30

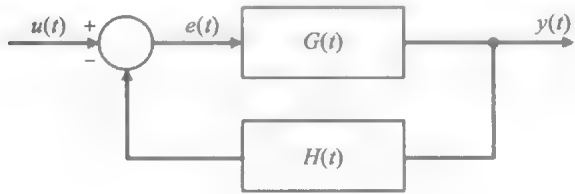


图 1.7 典型控制系统框图

然后

$$e(s) = \frac{u(s)}{1 + H(s)G(s)} \tag{1.53}$$

因此，从式（1.52）中，可以评估直接计算任何控制系统的稳态误差：

$$e(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \left[ \frac{su(s)}{1 + H(s)G(s)} \right] \tag{1.54}$$

示例 1.8 开环控制系统变换函数具有形式如下：

$$H(s)G(s) = \frac{90}{s + 10}$$

则当输入信号是单位幅度的阶跃函数时，系统的稳态误差是多少？

根据式（1.54），我们得到：

$$\begin{aligned} e(s) &= \lim_{s \rightarrow 0} \left[ s \frac{u(s)}{1 + \frac{90}{s + 10}} \right] = \lim_{s \rightarrow 0} \left[ s \frac{u(s)(s + 10)}{s + 10 + 90} \right] \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} \left[ s \frac{(s + 10)}{s(s + 100)} \right] = \lim_{s \rightarrow 0} \left[ \frac{s + 10}{s + 100} \right] = 0.1 \end{aligned}$$

因此，稳态误差为 0.1 或 10%。

## 1.6 系统稳定性分析案例研究

当系统以期望的输出振荡时，系统表现出不稳定的趋势。因此，没有这种行为的系统应该说 是稳定的，因此，系统的瞬态响应是主要关注点，也是系统分析中的一部分。因此，如果系 统保持接近平衡状态，即随着  $t \rightarrow \infty$ ，变量  $x$  和  $y$  仍然保持有界，则称系统是稳定的。如果动 态系统趋向于恢复平衡状态，则说系统是渐近稳定的。如果任何初始状态向量  $x(0)$  渐近稳

31



定，则认为平衡状态  $x_e$  是渐近稳定的，使得每个运动随着  $t \rightarrow \infty$ ，收敛到  $x_e$ 。因此，稳定性分析本质上与线性非时变系统的设计问题有关。

线性非时变系统描述为：

$$\frac{dx}{dt} = f(x,y) \qquad \frac{dy}{dt} = g(x,y)$$

其中  $f$  和  $g$  是  $x$  和  $y$  的连续函数，并具有连续偏导数，对于  $t \geq 0$  将具有唯一的解  $x = \Phi(t)$ ， $y = \Psi(t)$ 。稳定性的概念可以说明为  $x - y$  平面中的一个曲线，称为以  $t$  为参数的相平面。解用称为轨迹的曲线表示。

考虑在水平方向移动的质量  $m$ ，通过弹簧连接到墙上的一个固定点。忽略电阻元件和外力，得到的方程将是

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 x$$

定义

$$y = \frac{dx}{dt}$$

我们将有一个微分方程组：

$$\frac{dx}{dt} = y \qquad \frac{dy}{dt} = -\omega^2 x$$

其中

$$\begin{aligned} x &= \alpha \cdot \cos(\omega t + \beta) \\ y &= -\alpha \cdot \omega \cdot \sin(\omega t + \beta) \end{aligned}$$

这些方程定义轨迹：

$$x^2 + \left(\frac{y}{\omega}\right)^2 = \alpha^2$$

在  $x - y$  平面上，如图 1.8 所示，使用 ModelMaker 模拟软件的模拟结果， $x$  轴作为位移， $y$  轴作为速度，从初始条件  $x(0) = 1$  和  $y(0) = 1$  开始。

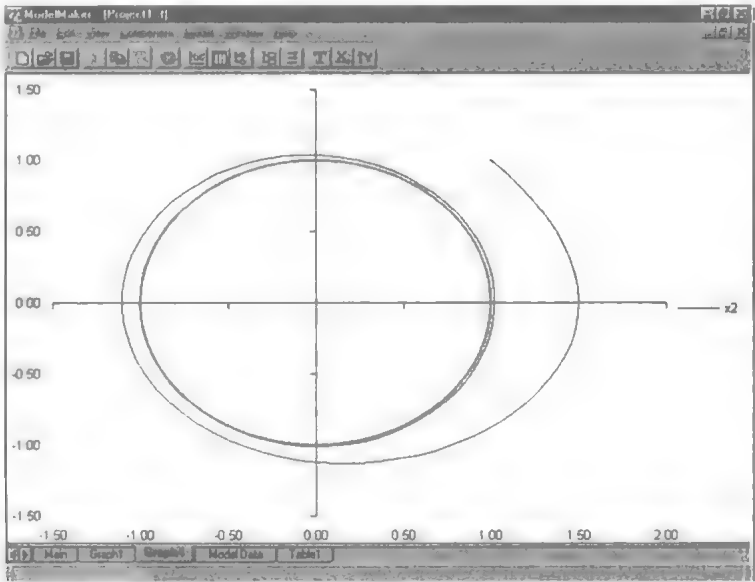


图 1.8  $x - y$  平面中的简单轨迹

显然, 图 1.8 所示的轨迹可以直接给出:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\frac{dy}{dt}}{\frac{dx}{dt}} = -\frac{\omega^2 x}{y}$$

为了研究接近平衡的动态系统的行为, 我们可以首先假设平衡点处  $x_0 = 0$  和  $y_0 = 0$ 。因此, 我们可以将平衡点定义为:

- 如果随着  $t \rightarrow \infty$ ,  $x$  和  $y$  保持有界, 则是稳定的;
- 如果随着  $t \rightarrow \infty$ ,  $x, y \rightarrow 0$ , 则是渐近稳定;
- 在任何其他情况下, 是不稳定的。

如前所述, 动态系统的稳定性分析非常重要。因此, 我们提出了不同的标准来确定动态系统的稳定性。用于确定线性非时变系统的稳定性的程序可以通过检查其特征多项式 (称为 Routh-Hurwitz 准则) 来实现。如果通过像简单指数函数这样的转换, 将时域公式转换为频域, 则可以通过 Nyquist 准则研究系统在频域中的稳定性, Nyquist 准则对应特定系统功能的虚拟或频率轴, 而频域变换及其随后的使用也限于线性系统。

33

## 1.7 练习

1. 术语系统是什么含义?
2. 举一个系统结构的例子。
3. 术语建模是什么含义?
4. 举一个系统模型的结构例子。
5. 术语系统分析是什么含义?
6. 举一个系统分析程序的例子。
7. 系统设计一词是什么含义?
8. 举一个系统设计结构的例子。
9. 术语测试信号是什么含义?
10. 举一个测试信号的例子。
11. 术语行为级别是什么含义?
12. 举一个行为级别的例子。
13. 术语复合结构层次是什么含义?
14. 举一个复合结构层次的例子。
15. 术语输入输出描述是什么含义?
16. 举一个系统的输入输出描述的例子。
17. 术语状态变量描述是什么含义?
18. 举一个系统的状态变量描述的例子。
19. 术语拉普拉斯变换是什么含义?
20. 在系统分析中给出拉普拉斯变换的例子。
21. 特征值是什么含义?
22. 举一个系统的特征值的例子。
23. 术语可控性是什么含义?
24. 举一个系统的可控性的例子。
25. 术语可观测性是什么含义?
26. 举一个系统的可观测性的例子。
27. 术语可识别性是什么含义?
28. 举一个系统的可识别性的例子。
29. 术语稳定性是什么含义?
30. 举一个系统的稳定性的例子。

## 参考文献

- (Kamal 2008) Kamal R.: Embedded Systems: Architecture, Programming, and Design, McGraw Hill Publ. 2008.
- (Luhmann 2012) Luhmann, N.: Introduction to Systems Theory, Polity Press, 2013
- (McDonalds Lowe 1971) McDonalds, A. C., Lowe, H.: Feedback and Control Systems, Prentice Hall, 1971
- (McDonalds Lowe 1975) McDonalds, A. C., Lowe, H.: Feedback and Control Systems, Prentice Hall, 1975
- (Meadows 2009) Meadows, D. H.: Thinking in Systems. Earthscan Publ. 2009.
- (Mitchel 2009) Mitchel, M.: Complexity- A Guided Tour, Oxford University Press, 2009.
- (Moeller 2003) Moeller, D. P. F.: Mathematical and Computational Modeling and Simulation, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2003
- (Möller 2014) Möller D. P. F.: Introduction to Transportation Analysis, Modeling and Simulation, Springer Publ. Series Simulation Foundations, Methods, and Applications, 2014.
- (Moser 1974) Moser, J. Ed.: Dynamical Systems, Theorie and Applications, Springer Publ. 1974.
- (Rockwell 2010) Rockwell, D.: State-Space Representation of LTI Systems, <http://web.mit.edu/2.14/www/Handouts/StateSpace.pdf>

## 嵌入式计算系统概述

考虑到第1章对系统的介绍, 2.1节开始对嵌入式计算系统做简要介绍。之后, 2.2节介绍了嵌入式计算系统的硬件架构。2.3节介绍了确定嵌入式计算系统设计指标的方法, 该方法根据需求规范定义设计的准确性。2.4节介绍了关于不同控制规则的数学符号表达式的嵌入式控制概念。2.5节介绍了软硬件协同设计的主要概念。由于传统方式设计生产力的预期增长率远远低于系统复杂度, 所以在过去十年中, 软硬件协同设计已经发展成为新的设计方法。2.6节介绍了系统稳定性分析概念的研究案例。2.7节包含系统理论领域的综合问题, 并提供了进一步阅读的参考文献和建议。

### 2.1 嵌入式计算系统

在第1章中, 对系统的相关概念和技术进行了简要介绍, 使不同工程和科学背景的读者对“系统”一词和系统研究所需的数学背景有相同的认识。嵌入式计算系统 (Embedded Computing System, ECS) 是具有嵌入式软件的计算机硬件, 并将嵌入式软件作为其最重要组件之一的专用系统。因此, ECS 是针对应用程序或产品的基于专用计算机的系统, 这与第1章中介绍的更通用的系统不同。

随着实现技术的不断完善, 由于系统复杂性越来越高, 以及严峻的上市压力, ECS 的设计越来越具有挑战性。此外, ECS 可以是独立的, 可以是较大系统的一部分, 也可以是异构系统的一部分。它们在各种应用程序中执行专用功能, 虽然用户通常不会看到这些功能。比如:

- 汽车辅助系统;
- 飞机电子;
- 家用电器/系统;
- 医用器材;
- 军事系统;
- 导航系统;
- 电信系统;
- 远程信息处理系统;
- 消费电子产品, 例如 DVD 播放器;
- 高分辨率数字电视。

与在特殊微控制器上实现的针对特定应用进行了优化的自主嵌入式子系统相比, ECS 存在多种网络选项。一般来说, ECS 有三个主要组成部分:

- 硬件, 由微处理器或微控制器、定时器、中断控制器、程序和数据存储器、串行端口、并行端口、输入设备、接口、输出设备和电源组成的硬件;
- 应用软件, 同时执行一系列任务或多个任务的应用软件;
- 实时操作系统, 用于监督应用软件, 为处理器提供运行预定进程的机制, 并在各种进程 (任务) 之间进行上下文切换。实时操作系统定义了 ECS 的工作方式。它按顺序组织对由一系列任务组成的资源的访问, 按照计划控制延迟, 并在满足最后期限的前提

下安排其执行。小型 ECS 可能不需要实时操作系统 (Kamal 2008)

嵌入式计算系统可分为三种类型:

- 小型嵌入式计算系统, 其设计采用基于复杂指令集计算机 (CISC) 架构的 8 位或 16 位微控制器, 如 68HC05、68HC08、PIC16FX 和 8051;
- 中等规模的嵌入式计算系统, 其设计有单个或几个基于 CISC 架构的 16 位或 32 位微控制器 (例如 8051、80251、80x86、68HC11xx、68HC12xx 和 80196), 数字信号处理器 (DSP), 或简化的指令集计算机 (RISC) 架构;
- 大规模嵌入式计算系统, 基于可扩展处理器或可配置处理器设计, 其基于具有 RISC 架构或带有 RISC 核心的 CISC, 例如 (80960CA、ARM7 和 MPC604), 以及可编程逻辑阵列, 其涉及巨大的硬件和软件复杂性。

38

除了微处理器和微控制器之外, ECS 还可以由专用集成电路 (ASIC) 或现场可编程门阵列 (FPGA) 以及其他可编程计算单元 (例如 DSP) 组成。由于 ECS 与模拟的环境持续互动, 因此通常必须具有执行模数 (A/D) 和数模 (D/A) 转换的组件。

ECS 设计问题的重要组成部分是选择系统的软件和硬件架构, 以及决定哪些部分应在可编程组件上运行的软件中实现和哪部分应在更专业的硬件中实现。因此, ECS 的设计应该基于更正式模型的使用, 即从需求导出的抽象系统表示, 在做出硬件和软件组合决策之前, 以高抽象级别描述系统行为。但嵌入式计算系统的设计并不是硬件或软件设计的直接结合过程。相反, 硬件和软件的设计理论和实践是针对这两个领域的各自属性量身定制的, 通常需要使用完全相反的抽象。

在硬件系统设计中, 系统由互连的、固有的并行构建模块、逻辑门和诸如处理器的功能或架构组件组成。虽然抽象级别发生变化, 但构建模块始终是确定性的或概率性的, 它们的组成取决于它们之间的数据流动。构建模块的形式化语义包括通常由方程式指定的传递函数 (见第 1 章)。因此, 构建硬件模型的基本操作是传递函数的组成。这种基于方程的模型是一种分析模型。

软件系统设计使用顺序构建模块, 例如对象和线程, 其结构通常动态变化。在设计中, 可以创建、删除或迁移模块, 来表示指令、子例程或软件组件。称为虚拟机或自动机的抽象机器在操作<sub>上</sub>定义了一个模块的正式语义。抽象机器可以是非确定性的, 设计者通过指定它们之间的控制流程来定义模块的组成。因此, 构建软件模型的基本操作是序列机的产物。这种基于机器的模型是一种计算模型, 可以包括用于描述嵌入式计算系统动态的程序、状态机和其他符号。

相比之下, 传统的软件设计得出了一个编译器可以从<sub>中</sub>生成代码的程序, 并且传统的硬件设计可以从计算机辅助设计 (CAD) 工具合成得到电路的硬件描述。在这两个领域中, 设计过程通常包含自下而上的活动 (例如组件库的重用和调整) 以及自上而下的活动 (例如连续的模型细化), 需要混合两种模式以满足设计要求。应该尽可能使用这种高度抽象的自动综合来确定系统的最终实施方案, 以确保在实践中正确的实施。

39

嵌入式系统设计的演变展示了设计实践如何从设计和实现层面的紧密耦合转移到两者之间的相对独立性 (Henzinger and Sifakis 2007)。

第一代方法的起源可以追溯到两个来源之一: 属于传统软件的基于语言的方法和由传统硬件产生的基于合成的方法。基于语言的方法集中在具有特定目标运行时系统的特定编程语言 (通常是具有抢占的固定优先级调度)。早期的例子包括 Ada 和最近的 RT-Java。基于合成的方法已经从电路设计方法演变而来。它们以易于处理的、结构化的片段式硬件描述语言开始, 例

如 VHSIC 硬件描述语言 (VHDL) (Ashenden 2008; Perry 2002) 和 Verilog (Vahid and Lysecki 2007), 并自动导出遵守一组给定约束的实现

第二代方法引入了设计级别与实现级别的语义分离, 以在早期设计阶段获得相对于特定执行平台的最大独立性。这有几种形式。同步编程语言在软件中体现了抽象硬件语义。实现技术可用于不同的平台, 包括裸机和时间触发的架构。SystemC 将同步硬件语义与来自软件 (C++) 的异步执行机制相结合。实现需要分割成一部分硬件实现的组件, 另一部分在软件中实现。常用数据流语言的语义, 例如 MATLAB 的 Simulink (Klee and Allen 2011), 通过仿真引擎定义。因此, 实现集中于生成有效的代码。用于描述分布式系统的语言, 例如规范和描述语言 (SDL), 通常采用异步语义。

第三代方法基于建模语言, 例如统一建模语言 (UML) (Booch et al. 2005; Rumbaugh et al. 2004) 和架构分析与设计语言 (AADL) (Feiler and Gluch 2012), 并超越实现的独立性。它们不仅在选择实现平台时, 而且在选择抽象系统描述的实现和交互语义时都是通用的。这导致独立于特定的编程语言, 以及强调系统架构作为组织计算、通信和资源约束的手段。最近的研究热点集中在表达不同的计算模型和它们互操作的框架上 (Balarin et al. 2003; Balasubramanian et al. 2006; Eker et al. 2005; Sifakis 2005)。这些框架支持从组件和高级原语构建系统以进行协调。它们的目标不只是提供一种常见的元语言的不连续模型, 也可以在模型组合过程中保留属性, 并支持跨异构模型界限中有意义的分析和转换。

嵌入式计算系统的市场规模的增长, 意味着全球 ECS 市场将持续增长, 预计增长率约为 14%。Patrick Hook Associates 的汽车行业声明: “现在和未来的嵌入式软件系统与 90% 的汽车创新相关。”通过比较台式电脑和笔记本电脑与 ECS 的生产状况表明, 在仅仅一年的时间里, 生产了数百万台台式电脑和笔记本电脑, 但生产了数十亿个 ECS。

嵌入式计算系统的趋势变得越来越复杂, 有更多的资源 (处理能力、内存、带宽), 可以用较高级的编程语言 (例如 C/C++、Java 等), 还可以与其他系统进行通信, 而且往往不是基于组件行业标准的。因此, 基于不同的计算组件, 可将 ECS 集成到许多重要和创新的科学与工程的多多样化应用领域 (见图 2.1)。

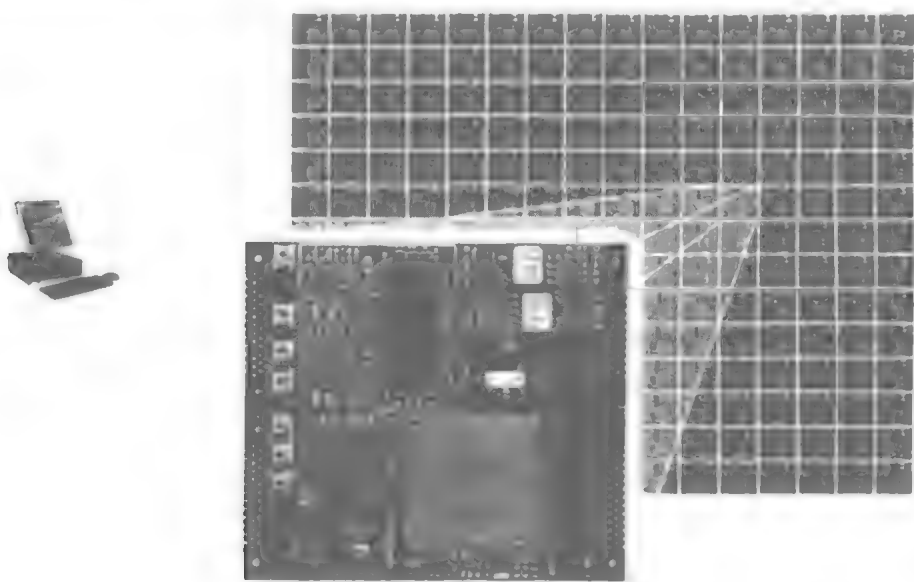


图 2.1 PC 与基于 FPGA 的 ECS



2.2 嵌入式计算系统的硬件架构

嵌入式计算系统通常基于标准和应用程序特定的组件，这些组件除了软件之外还采用专用的硬件结构，使微处理器和微控制器具有特别重要的意义

41

微处理器和微控制器用于实现所需的系统功能。例如，以下功能可以在也称为通用处理器（GPP）的微处理器（ $\mu P$ ）、微控制器（ $\mu C$ ）、数字信号处理器（DSP）、单用途处理器（SPP）、应用程序专用处理器（ASP）或可编程逻辑器件上实现：

```
total = 0
for i = 1 to N loop
    total += M[i]
end loop
```

微处理器（ $\mu P$ / GPP）的基本体系架构概念如图 2.2 所示。这包括：

- 可在许多应用中使用的可编程单元；
- $\mu P$ / GPP 的典型特征如下：
  - 程序内存；
  - 具有很好的算术逻辑单元（ALU）和寄存器文件的通用数据流路径；
- 用户的优势：
  - 上市时间短；
  - 一次性工程成本（NRE）低；
  - 灵活性强。

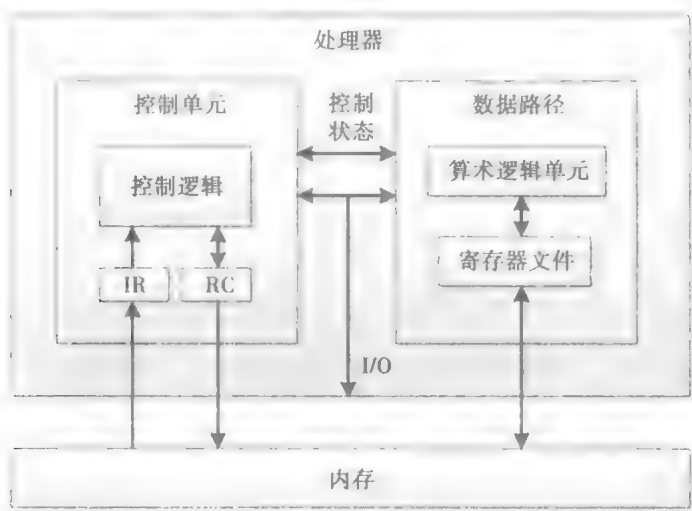


图 2.2 微处理器内核的基本概念

42

相比之下，微处理器在本质上与微控制器不同。除了标准处理器核心，微处理器还具有更多独立的集成在其芯片上的操作单元，用于特定任务。例如，该单元可以是转换输入模拟信号的模数转换器和将经处理的数字信息转换为模拟输出信息的数模转换器。微控制器具有几种不同类型的特殊组件，以适应嵌入式计算系统的应用领域。

单用途处理器（SPP）的基本架构概念如图 2.3 所示。它包括能够执行单个专用程序的数字电路。

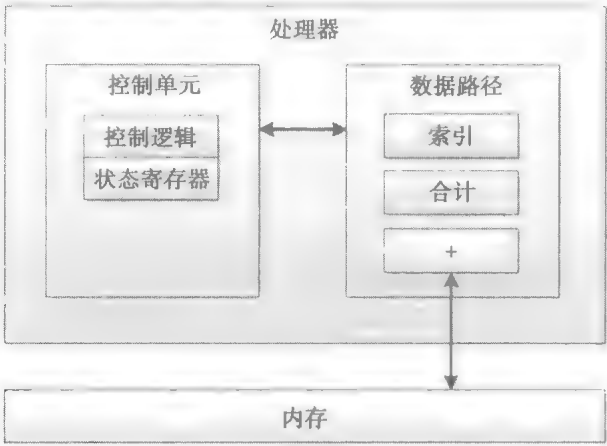


图 2.3 单用途处理器内核的基本概念

- 技术特点：
  - 仅包含执行单个专用程序所需的组件；
  - 不包含程序存储器。
- 用户优势：
  - 快速；
  - 低功耗；
  - 硅片面积小。

应用程序专用处理器（ASP）的基本架构概念与图 2.2 所示的相似。它包括一个针对具有相同特性的一类微小应用进行了优化的可编程处理器。

- $\mu P$  和 SPP 之间的妥协；
- ASP 的技术特点：
  - 程序内存；
  - 优化的数据流；
  - 具体功能单元。
- 用户的优势：
  - 灵活性；
  - 性能；
  - 硅面积消耗低；
  - 电能消耗低。

43

2.2.1 可编程逻辑器件

定制逻辑器件是根据客户的特殊逻辑电路规格（完全定制电路）制造的。要实现可接受的单价，需要更高的生产量，这通常不是逻辑电路设计中的常见情况。这导致了半定制逻辑模块（半定制电路）的引入。这个名字来自于这样一个事实：高集成密度的集成逻辑模块的半成品大量生产，客户进行最终的编程。这些可编程逻辑器件（PLD）实现了非常高的增长率，因为它们非常灵活，并且生产量大而成本较低。此外，技术进步迅速，引起了显著的先进技术规格，例如：

- 门密度；
- 速度；
- 成本；
- 架构灵活性；
- 技术；
- 外壳尺寸；
- 开发工具。

因此，门密度从初始的 100 个增加到 500 个，从简单尺寸的电路到超过 100 000 个门的复杂尺寸的电路，并且现在已经在复杂的现场可编程门阵列（FPGA）中达到了超过一百万的门密度，信号延迟从初始的 45 ns 减少到小于 10 ps。由具有 20 个端子的双列直插封装（DIP）组成的初始设置逐渐被具有 175 个或更多连接的引脚格栅阵列替代；塑料片上包装更换为 154 或 160 口以上。这些半定制逻辑器件的程序设计可以通过两种不同的方式实现：

- 掩模编程（制造商）；
- 现场编程（用户）。

掩模编程过程是整个逻辑电路的一部分，通常由用户开发并提供给制造商实施。如果电路设计师的竞争对手的产品在同一制造地点，利用现有的部分设计或完全公开客户的电路设计给制造商将使其成为一个敏感问题。因此，设计人员开始通过引入现场可编程逻辑硬件组件来摆脱这种设计技术。图 2.4 给出了各种标准逻辑组件和 PLD 的概述。如图 2.4 所示，因为数字半定制集成电路连接技术相对简单，所以其是现场可编程的。这种技术优势使得其能够尽早进入市场，因此最终产品中，与掩模可编程逻辑器件相比，现场可编程逻辑器件的比例显著增加，并呈上升趋势。

44

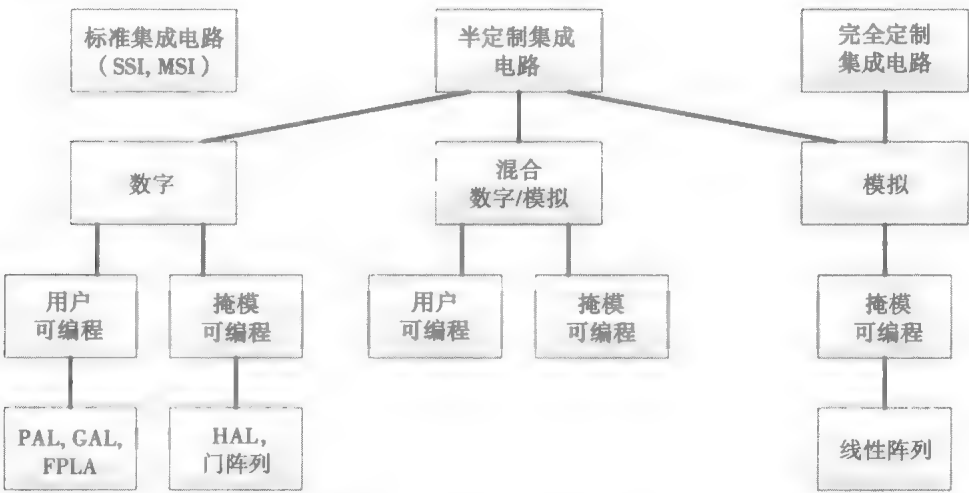


图 2.4 逻辑器件的制造技术

图中使用了首字母缩略词或初始化表示，其含义如下：

- FPLA 现场可编程逻辑阵列
- GAL 通用阵列逻辑
- HAL 硬件阵列逻辑
- PAL 可编程阵列逻辑

45

SPLD 被称为单片 PLD，在 100 ~ 500 个门当量的情况下，其具有 60MHz 和 200MHz 的时钟周期。CLPD 被称为块分割 PLD，在 500 ~ 20 000 个门当量的情况下，其具有 25MHz 和 200MHz 的时钟周期。FPGA 也称为通道阵列 PLD，在 1000 ~ 100 万门当量的情况下，其具有 10MHz 和 100MHz 时钟周期。这种分类方法可以是任意的，可能并不完整，但也不脱节，这仅仅是一种创建结构概览的方式。

2.2.2 可编程门阵列

FPGA 提供最大的自由度，因为它们的芯片面积受到其利用的折叠或阻塞部分的限制。特别是 FPGA 的内部结构有利于支持自动化综合。FPGA 还具有一致和统一的结构，分为以下四类：

- 对称矩阵；
- 序列阵列；
- 门海；
- 分层 PLD。

因此，FPGA 在一个芯片上包含超过  $10^6$  个可编程元件，并且必须满足可编程元件的以下属性：

- 最小芯片面积；
- 低电阻和高电阻 OFF；
- 低寄生电容，其中通过静态随机存取存储器（SRAM）、可擦除可编程只读存储器（EPROM）、电可擦除可编程只读存储器（EEPROM）或反熔丝技术进行编程。

Xilinx FPGA 的架构如图 2.5 所示。包括：

- 可配置逻辑块（CLB）；
- 输入/输出块（I/O 块）。

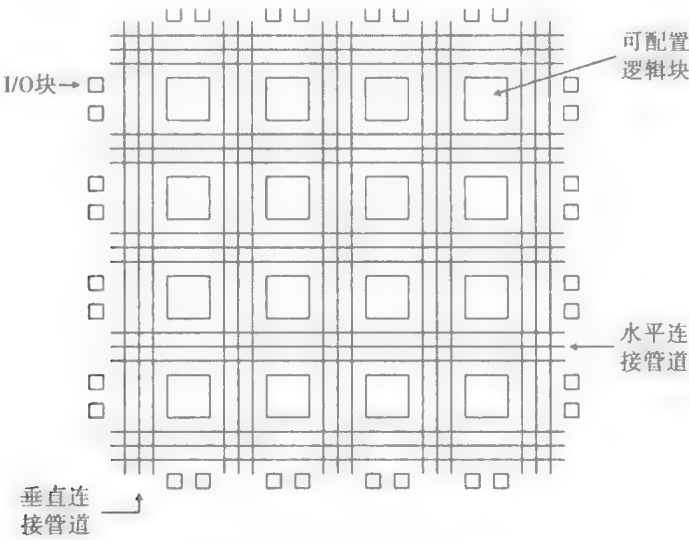


图 2.5 Xilinx FPGA 的一般架构

CLB 由 FPGA 中最小的可编程单元的基本元件、输入块、输出块和逻辑运算组成。在内部，有来自组合顺序逻辑元件的 CLB，使得输入  $i_0 \sim i_n$  以及输出  $Q_0$  和  $Q_1$  可以以任何方式彼此组合两次。出现在输出端的信号可以从 CLB 中的逻辑运算、组合脉冲、时钟脉冲或表示锁存

46

信号  $di$  中产生。CLB 的控制信号为  $ce$ （时钟使能）、 $k$ （时钟）和  $rd$ （直接异步复位）。这些信号以适当的内部特权控制 CLB。CLB 占用的面积可以根据所使用的技术来估计，具体如下：

$$A_{CLB} = A_{RLLB} + (M * A_{SRAM} * 2^K)$$

其中，以  $A_{RLLB}$  作为逻辑块的占用面积， $A_{RLLB}$  作为无触发器的逻辑块的表面， $M$  作为触发器的位平面， $A_{SRAM}$  作为 SRAM 技术的一个位区域， $K$  为逻辑功能的表面。

在由水平和垂直连接元件组成的 CLB 之间存在二维互连网络。这些连接是可以相互编程的。连接本身被细分为：

- 短线连接，即直接连接（直接互连）和通用互连（一般用途互连）；
- 长线连接，用于长距离通信，是芯片级的连接。

这种分类的原因可以在芯片上的灵活性和信号传播方面的最优解的背景下看出。因此，图 2.6 显示了 CLB 的结构，包括开关矩阵和可编程连接（直接连接），以及通用连接（通用互连）和长通信线（长线）之间的链接。

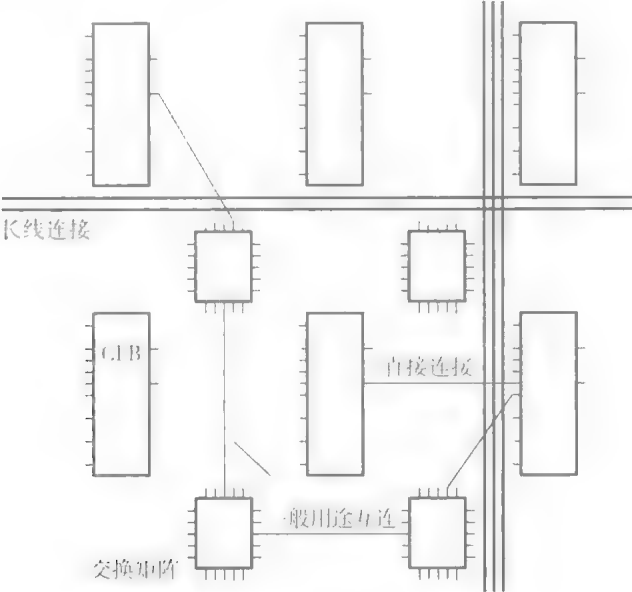


图 2.6 FPGA XC3000 (Xilinx) 的连接结构

直接连接是最短的，因此是最有效的连接；然而，因为这些连接只能在 CLB 从某些输入到相邻的 CLB 产生某些输出，所以会存在某些限制。直接互连用于从 CLB 到其相邻 CLB 的连接，并且它们可以独立于通用链路的资源进行切换。对于包含多于一个 CLB 的组合，通用连接（通用互连）具有水平和垂直管道，每行四线，每列五线。这里，插入开关矩阵，这使得可以以不同方式配置 CLB 连接。一般连接的组合显示与数据路径相关的延迟，因为这些线段中的每一个都必须通过交换矩阵的数据路径交换机（路由交换机）。一般连接从一个互连开关进入下一个连接，并可以根据它们的编程进行切换。可编程连接的概念提供了很大的灵活性，但具有适当长度和不确定持续时间信号的缺点。对于整个长度的芯片通用连接，片上长线可用于每个 CLB 更远距离的低延迟连接，但其数量有限。内部互连产生的 CLB 的变异性，在设计过程中提供了非常高的灵活性。然而，这种灵活性要求用户为这些块提供特殊图形化输入设备的输入，这是保证 CLB 有效使用的唯一方法。I/O 块表示与外部的连接。每个 I/O 块都可以编程为数据输入、数据输出或双向数据交换。也可以缓冲 I/O 块中的数据。在图 2.7 中，展示出

了 Xilinx XC3000 FPGA 的 I/O 块 (IOB) 结构示例。

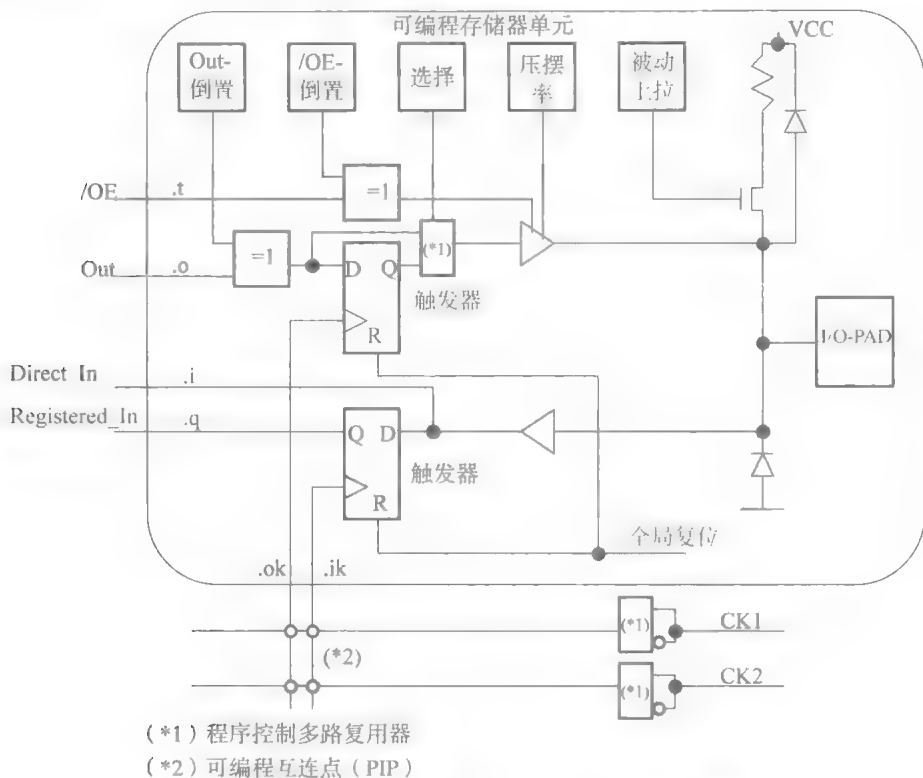


图 2.7 FPGA XC3000 (Xilinx) 的 I/O 模块结构

赛灵思 FPGA 在所谓的启动阶段进行配置。在这种情况下，配置的描述程序由外部 ROM 写入静态 RAM 单元的芯片内部矩阵中。该矩阵是用户程序下面的一层，最小化 CLB。在配置期间，可以选择两种选项：串行或并行。

描述应用程序特定逻辑功能的方式取决于所使用的 FPGA 器件。它不能直接转移到其他设备模块。为了描述和编程 Xilinx FPGA 的应用程序特定功能，可以使用设计工具，例如 Xilinx 自动 CAE 工具。这些工具包括设计管理器，负责调用各种程序的必要设计步骤，CLB 级的设计编辑器以及可编程的互连路径，以执行更精细且更优化的设计。因此，使用 Xilinx FPGA 的具体应用的设计过程分为三个步骤：

- 设计输入；
- 设计实施；
- 设计验证。

设计输入是用特定的设计编辑器完成应用程序功能图的输入，应用程序的逻辑方案基于基本构建块（逻辑功能）、宏（计数器，寄存器，触发器）、连接线进行设计。因此，应用程序的原理描述显示在设计编辑器的输出文件中，该输出文件与设备特定格式的特定接口协议相关联，例如 Xilinx 网表文件，其中包含了设计图上的所有必要信息。在设计实现期间，提示的功能方案逐步实现到 FPGA 器件的特定架构。首先检查设计是否存在逻辑错误，例如在门处缺少连接，此后，为逻辑硬件设计的最小化去除不必要的逻辑组件。下一步是传输 FPGA 元素的逻辑功能，这些元素是 CLB 和 IOB。为此，将设计的功能划分为各个块。如果逻辑功能可以划分到芯片上的现有块，那么选择（路由）必要的混合物，并插入到最终的设计文件中。从该文件



中，生成特定的布局路由算法以及FPGA的相应配置程序。设计验证涉及在方案输入过程中模拟功能和时间行为。与大型CLB赛灵思FPGA架构相比，Actel FPGA由一系列小型的、简单的逻辑模块和IOB组成。可编程逻辑模块之间存在二维连接网络，由水平和垂直连接组成。连接资源分为：

- 输入段；
- 输出段；
- 时钟线；
- 连接片段。

连接段由通过逻辑模块连接的四个输入段组成。输出段将逻辑模块的输出连接到块上方和下方的连接通道。时钟线是用于连接多个逻辑模块的特殊低延迟连接。连接段由不同长度的金属导体组成，可以使用反熔丝技术组装来创建更长的线。与以前讨论的Actel FPGA概念相反，Crosspoint FPGA属于与分层Altera PLD类别类似的串行块结构FPGA架构。满足分层PLD架构的现场可编程门阵列也可从Advanced Micro Devices（AMD）获得。该架构基于EPROM技术中可编程逻辑阵列块（LAB）的分层分组技术，由两种类型的单元组成：

- 可编程LAB；
- IOB。

50

从图2.8可以看出LAB可编程逻辑块通过可编程互连阵列（PIA）连接内部和外部，这些组合物又由水平和垂直的连接线实现。

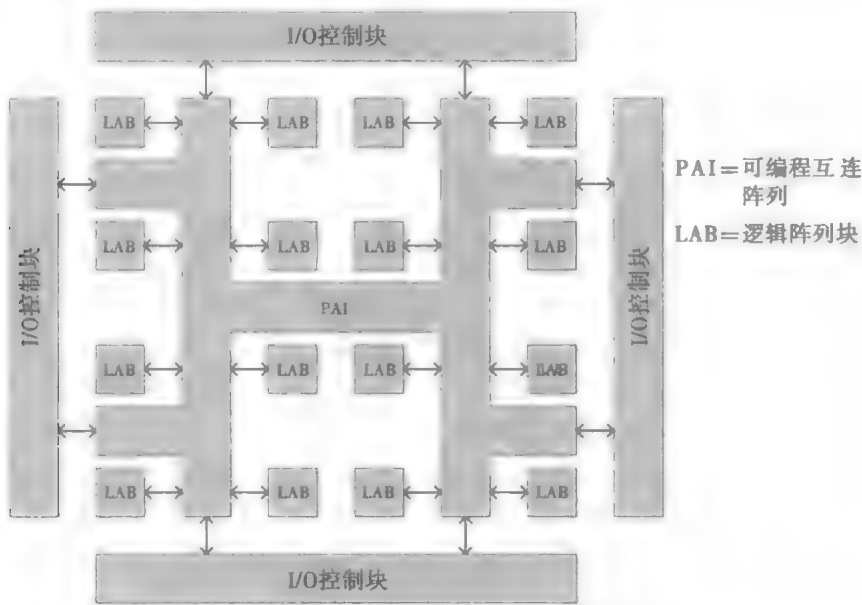


图 2.8 Altera FPGA 架构的块结构

LAB 可编程逻辑块包括宏单元阵列和产品项阵列。该阵列的每个宏单元包括三个“与”门、一个“或”门、一个与之相连的“异或”门，这些逻辑门产生宏单元的输出信号。另外，宏单元还包括一个触发器。产品术语“阵列”包含用于宏单元逻辑门的有线“与”门连接。

第四个FPGA概念基于所谓的“海门”结构，其中包括块矩阵中的大量块，并且其中的每一个块只能连接到其直接的四个相邻块。该FPGA结构中的连接通过多路复用器实现，这些复用器通常在可编程静态随机存取存储器（SRAM）中实现。较长的组合可以将组合物通过多路复用器循环到块中来实现。

51 四类 FPGA 模块对于适用于可编程逻辑硬件组件的集成应用是有用的。

## 2.3 设计指标

市场需求和技术发展对近年来 ECS 的设计产生了巨大的影响。现实情况是 ECS 的复杂性不断增加。这一方面标志着技术创新周期的进步,另一方面标志着产品需求的增加。复杂性不仅基于 ECS 中合并的单个组件的数量,而且还取决于所使用的硬件和软件的异质性,总体上仅是所需的功能的异质性。这需要一种用于设计复杂结构的方法,其中包括不同组件之间的适当接口,包括它们与系统环境的集成,同时考虑到实施技术的持续改进。由于系统复杂性的增加以及不断上升的市场压力,ECS 的设计变得更具挑战性。因此,系统实现的可衡量特征需要映射系统设计的关系和性能水平,证明本设计在多大程度上符合系统规范质量标准,例如 IEEE 标准 1061,1992。这可以通过隶属函数来表示,该函数映射关于目标函数的要求。设计特征的数学表示必须满足由度量确定的规格。对于相关指标,可以:

- 比较嵌入式计算系统设计的草案,以达到其规格,即正式的比较和评估选项;
- 处理嵌入式计算系统中增加的系统复杂性和需求;
- 将开发和测试成本与嵌入式计算系统的硬件-软件划分约束进行比较,以确定硬件和软件组件之间功能分解的最佳匹配;
- 确定在开发和生产嵌入式计算系统时所假设的上市时间限制的风险;

在此背景下,制造商始终必须遵守较短的产品开发周期,以更快地将创新产品推向市场。这要求产品开发和制造专注于上市时间,因为产品的经济成功取决于其及时可用性。这导致:

- 开发和生产嵌入式计算系统及其最佳服务和维护的时间压力;
- 重用硬件和软件组件;
- 嵌入式计算系统设计中的连续性和渗透性。

因此,创建质量模型的一般系统方法至关重要,可以基于以下常用度量

- 灵活性:能够改变嵌入式计算系统的功能,而不会产生很大的 NRE 成本;
- 可维护性:在初次发布后修改系统的能力;
- NRE 成本:设计嵌入式计算系统的一次性货币成本;
- 性能:嵌入式计算系统的执行时间或吞吐量;
- 功率:嵌入式计算系统消耗的功耗;
- 大小:嵌入式计算系统所需的物理空间;
- 上市时间:开发系统所需的时间,以便将其发布和销售给客户;
- 原型时间:构建嵌入式计算系统的工作版本所需的时间;
- 单元成本:制造嵌入式计算系统的每个副本的货币成本,不包括 NRE 成本。

因此,适应上述约束的设计度量必须考虑用于相应设计的硬件体系结构。当使用通用处理器(GPP)时,使用面向 GPP 的度量是合适的。目标是确定依赖于涉及条件的控制流、复杂数据结构 and 复杂 I/O 管理,例如参考文献(Sciuto et al. 2003)所示的操作的功能。在 ASIC 设计的情况下,类似 ASIC 的度量是适当的。目标是识别显著依赖于涉及位操作的常规操作功能,并最终导致相应的度量方法。

正如参考文献(Sciuto et al. 2003)所示,亲和函数可以通过应用于度量的线性组合的归一化函数来表示,权重取决于所考虑的执行者类。直观地,对 GPP 执行者的亲和性主要取决于:

- I/O 比;

- 条件比例；
- 结构比；
- GPP 兼容类型的声明变量数。

因此，可以评估每个硬件兼容类型的亲和性。

尽管提出了软件开发方面的许多改进，但由于嵌入式计算系统中软硬件的强烈依赖，嵌入式计算系统设计师面临着将这些改进应用于软件开发方面的艰巨任务，以及需要通过传统指标衡量的软件质量与特定平台优化之间的权衡。这需要评估软件产品的质量指标与嵌入式系统的物理度量之间的关系，以指导设计人员在模型层面进行设计空间探索时选择最佳设计方案 (Oliveira et al. 2008)。

53

描述创建质量模型的一般过程的度量机制包括：

- 描述公司和项目的环境以及任务，并定义审查；
- 确定目标；
- 确定评估目标和相关指标；
- 定义数据收集工作流程；
- 收集、分析和解释数据；
- 总结和运用经验来开发最佳实践。

为了描述模型的质量，必须要定义评估要素，包括：

- 适应变化；
- 使用的硬件组件的效率；
- 书面源代码的效率和质量；
- 灵活性，嵌入式计算系统的功能可大大增加，而无需 NRE 的需求，软件通常非常灵活；
- 功能安全；
- 大小，软件经常以字节表示，硬件通常表示为门或晶体管；
- 正确性，嵌入式计算系统的功能和测试功能已正确实施；
- 成本；
- 功率；
- 存储条款；
- NRE，一次性开发成本；
- 性能；
- 可移植性；
- 反应性，实时能力，即反应时间的改变；
- 接口兼容性；
- 安全性，保证嵌入式计算系统的安全运行；
- 硅片区域；
- 可扩展性；
- 上市时间，生产嵌入式计算系统的市场版本所需的时间，包括开发时间、生产时间、测试和评估时间；
- 原型时间，制作嵌入式计算系统的工作版本的时间；
- 单位成本 (UC)，无 NRE 的单位成本；
- 可用性；
- 可维护性，首次发布后修改嵌入式系统的能力；

54

- 可靠性。

因此，目标节点度量可以根据指定的单元范围进行评估。例如，ECS 的开发过程可以从客户的角度且在 NRE 的背景下，针对源代码的效率，以实现功能安全性为目标，可以描述如下：

评估要素	度量	说明
1	1.1	适应已知过程
	1.2	新过程
2	2	高要求
3	3.1	结构程序
	3.2	XML
4	4	高
5	5.1	低
	5.2	中度

对于上述示例，给定隶属函数的程度，可以以  $n$  元组符号的形式表示：

$$\min E(\Psi) = E(\Psi M1.1, \Psi M1.2, \Psi M2, \Psi M3.1, \Psi M3.2, \Psi M4, \Psi M5.1, \Psi M5.2)$$

其中， $M1.x$  = 过程功能， $M2$  = 要求功能， $M3.x$  = 功能代码， $M4$  = 客户功能， $M5.x$  = 项目要求功能，从而，当  $M1.x, M2, M3.x, M4, M5.x \in \Pi$  时，

当  $M1.x = M2 = M3.x = M4 = M5.x$  时， $\Psi(M1.x, M2, M3.x, M4, M5.x) = 0$

当  $M1.x \neq M2 \neq M3.x \neq M4 \neq M5.x$  时， $\Psi(M1.x, M2, M3.x, M4, M5.x) = 1$

其中  $\Psi$  是  $\Pi$  的度量。因此，隶属函数的实现程度可以举例说明如下：

$$\min E(\Psi) = E(1,0,1,0,1,1,1,0)$$

也就是说，ECS 的开发过程已经最佳地适应了已知的简单过程；不能创造一个新的过程；对功能安全的高要求得到了最佳的满足；对书面源代码的效率和质量要求得到最佳的满足；ECS 的设计从客户的角度来看最适合；由于对项目的要求较低，NRE 已经得到最佳实现。另外，对于隶属函数的履行程度除了指定值 0 和 1，中间值也是可能的，例如 0.1，0.2，0.3，…，0.9。

55

2.4 嵌入式控制系统

控制系统的概念代表了一种非常常见的嵌入式系统。该概念描述了一个过程，其中控制系统寻求制造系统的输出，其动态取决于所选择系统的环境模型，跟踪不需要系统输出反馈的期望输入，这称为开环控制。因此，对于以下方面，嵌入式控制系统的设计提高了系统性能：

- 系统精度；
- 系统响应速度、被响应和稳定时间的最大持续间隔；
- 稳定性。

闭环控制系统提供从系统输出到参考输入的反馈，用于进一步完成控制决策处理。可以通过适当的控制动作来检测和补偿干扰的影响，这些控制动作的特征在于强度和时间顺序。这个补偿是基于带负号的反馈。因此，可以得出以下关系：

- 控制过程由嵌入式闭环控制系统环境的干扰触发。
- 发生故障，并在嵌入式闭环控制系统中进行识别，该系统连续观察并比较系统的输出与参考输入。
- 闭环嵌入式控制系统中的实际系统输出与参考输入的偏差释放了对设定值的适配。因

- 此，扰动的影响明显减轻。为了实现这一效果，必须在闭环动作中引入反转符号。
- 嵌入式控制操作的封闭动作是独立的，因此，控制回路的时间序列由通过其传递函数描述的相应部分确定，它们遵循因果关系的原则，即控制电路产生相关响应（效应）的原因。为此，通过控制回路，根据受控系统的传递函数将块元件的传递函数的输入激励传递到输出。信息应始终是有向的，即在一个方向上。因此，在控制系统的表示中使用有向箭头（称为动作线）。

2.4.1 控制

控制是指与其观察到的模块转移元素相对应的过程的定向影响。控制系统中影响一个或多个变量的活动作为输入变量，其他变量作为输出变量的，这些都是基于系统的内在规律的。此外，在控制系统中，系统的输出不仅取决于参考输入（设定值）的序列的单方面影响，也取决于发生的扰动。参考输入根据物理规律和连接或定时作为输出块传输元件的控制输入，从而建立所需的行为。虽然系统的输出对参考输入（缺少反馈）没有影响，但由于来自所需目标值的外部干扰，系统的输出可能会不同。因此，可以引入嵌入式控制系统作为由串联连接的多个传输块组件组成的基于开环的传递函数。其概念解释中的控制原理如图 2.9 所示。

56

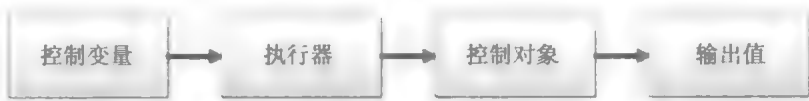


图 2.9 控制系统的框图结构

在实际的控制系统中，干扰经常发生在任何时间和幅度下，它们可能会使系统输出显著偏离参考输入。在此背景下，通过单独的转换模块捕获系统的输出是有用的。在系统输出偏离参考输入的情况下，可以通过反馈控制原理来减小干扰对环境的影响。因此，简单的开环控制系统不能对可预见的干扰起作用。在最简单的情况下，需要一个系统，该系统具有用于观察系统输出的转换组件，并将输出与参考输入进行比较，以计算它们之间的误差，迫使系统的输出遵循参考输入，该原理就是闭环控制系统。

2.4.2 反馈控制

反馈的概念描述了带有系统输出的控制系统，其动态的选择取决于系统的环境模型，其在保持对干扰的影响相对不敏感时遵循参考输入。在两个信号之间存在差异的情况下，反馈回路的求和点产生传送到控制器输入的误差信号。控制器根据控制策略对错误进行操作，并操纵环境模型，使其跟踪参考输入。此外，关于当前的干扰输入，这个闭环反馈使系统的输出服从参考输入。因此，闭环控制包含比开环控制更多的传输元件。闭环控制的传输元件有：

57

- 环境或过程：要控制的系统；
- 系统输出：要控制的特定系统方面；
- 参考输入：系统输出所需的量；
- 执行器：用于控制对环境或过程的输入的装置；
- 控制器：用于产生输入到执行器或设备的装置，以强制系统的输出遵循参考输入。因此，控制器包含使所需输出轨迹成为所需参考输入的控制策略；
- 干扰：环境对被控状态造成的额外不良输入，可能导致系统输出与参考输入的预期输出不同。

至此，这些传输元件与开环控制系统是相同的。闭环控制系统具有以下附加传输元件：

- 传感器：测量系统输出的设备；
- 误差检测器：确定测量的系统输出和参考输入之间的差异。

因此，闭环控制器通过使用传感器和误差检测器连续检测和比较参考输入和系统输出之间的电位差。误差检测器的误差值由控制器的输入读取，然后计算一个设置值，用于操纵执行器，此后操作闭环嵌入式控制系统的环境。控制器用来自误差检测器的反馈，根据已经实现的控制器的控制规律强制系统的输出。执行器根据误差检测器输出和控制器传递功能对要求进行修改。在图 2.10 中，显示出了闭环控制系统的框图，包含其概念注释涉及上述传输元件。

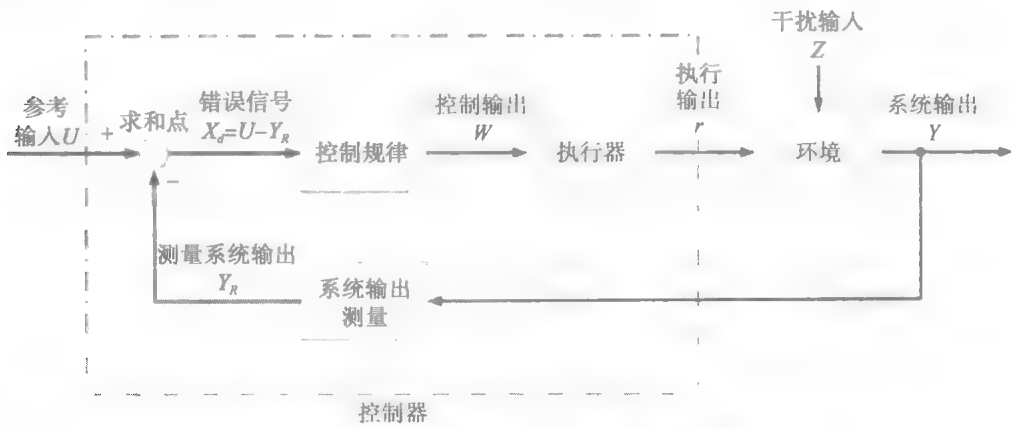


图 2.10 以框图展示的控制环路的封闭动作

在控制回路循环中，闭合动作序列涉及的术语总结在下表中：

符 号	名 称
$u(t)$	参考输入或设定值
$x_d(t)$	误差检测或控制偏差值
$y(t)$	控制输出或校正输入值
$r(t)$	执行输出值
$z(t)$	扰动输入值
$x(t)$	系统输出或控制变量值
$x_R(t)$	测量的系统输出或测量的控制变量

在图 2.10 中，控制系统的结构以框图的形式呈现，描绘为表示某些基本数学运算符号的互连，使得整体图遵循系统的数学模型，如第 1 章所述，块之间的互连线表示描述系统行为的变量，例如输入和状态变量（见 1.2 节）。对于没有初始能量的固定线性系统，输出  $y(t)$  由下式给出：

$$y(t) = G(t) \cdot u(t)$$

其中  $G(t)$  是传递函数， $u(t)$  是输入。因此，框图仅仅是一组代数方程式的图形表示，允许通过计算等效传递函数来组合块，从而简化图。

当一个输出只输入到另一个输入时，认为两个块是串联的，如图 2.11 所示。

单个块的传递函数为：

$$G_1(t) = \frac{y_1(t)}{u_1(t)}, G_2(t) = \frac{y_2(t)}{y_1(t)}$$

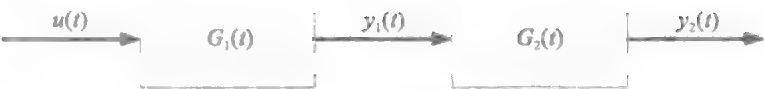
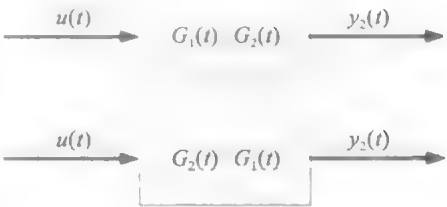


图 2.11 串联两个块

因此，如果将  $u_1(t) \cdot G_1(t)$  代入  $y_1(t)$ ，则发现  $y_2(t) = G_2(t) \cdot u_1(t) \cdot G_1(t)$ 。这些等式是不同形式的相同方程，证明了串联在一起的简单线性块可以相乘在一起的重要思想，这一事实可以实现将这样的两个块减少到单个块，如图 2.12 所示。

当两个模块具有公共输入，并且它们的输出通过求和点组合时，认为两个块是并联的，如图 2.13 所示。各模块具有传递函数  $G_1(t)$  和  $G_2(t)$ ，求和点的符号均为正，总传递函数  $y(t)/u(t) = G_1(t) + G_2(t)$ ，如图 2.14 所示。



59

图 2.12 图 2.11 得到的结果块（详情见正文）



图 2.13 两个并联的块

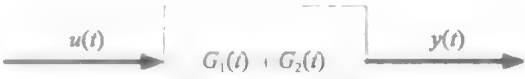


图 2.14 图 2.13 得到的结果块（详情见正文）

为了证明这一点，请注意：

$$y(t) = y_1(t) + y_2(t)$$

其中  $y_1(t) = G_1(t) \cdot u(t)$ ， $y_2(t) = G_2(t) \cdot u(t)$ 。替换  $y_1(t)$  和  $y_2(t)$ ，我们有：

$$y(t) = [G_1(t) + G_2(t)]u(t)$$

如图 2.15 所示，有从求和点到输出的前向路径的反馈系统框图，以及从系统输出返回到求和点（闭环）的反馈路径。

60

框图显示了反馈控制系统的最简单形式。控制系统输入输出的变换分别为  $u(t)$  和  $y_1(t)$  传递函数

$$G_1(t) = \frac{y_1(t)}{u(t)}$$

被作为前向回路增益或前向传递函数引入，并且函数

$$H(t) = \frac{y_2(t)}{y_1(t)}$$

作为反馈回路增益或反馈传递函数

反馈系统的模型根据其前向和反馈传递函数  $G(t)$  和  $H(t)$  给出。通常需要确定闭环增益或闭环传递函数：

$$F(t) = \frac{y_1(t)}{u(t)}$$

通过求出比例  $y_1(t)/u(t)$ ，该函数可以从闭环系统

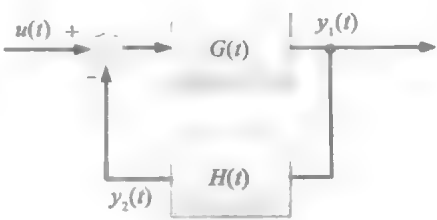


图 2.15 反馈回路



的块代数方程派生，如图 2.5 所示。在与框图对应的一组方程中，产生如下方程组：

$$V(t) = u(t) - y_2(t)$$

$$y_1(t) = G(t) \cdot V(t)$$

$$y_2(t) = H(t) \cdot y_1(t)$$

让我们组合这些方程来消除  $V(t)$  和  $y_2(t)$ ：

$$y_1(t) = G(t) \cdot [u(t) - H(t) \cdot y_1(t)]$$

通过重新排列得出：

$$[1 + G(t) \cdot H(t)] y_1(t) = G(t) \cdot u(t)$$

因此，闭环增益或闭环传递函数

$$F(t) = \frac{y_1(t)}{u(t)}$$

变为：

$$F(t) = \frac{G(t)}{1 + G(t) \cdot H(t)}$$

很清楚，求和点处的反馈信号的符号为负。假设求和点的符号对于反馈信号为正，则闭环增益或闭环传递函数将变为负值。假设当反馈传递函数为 1 时出现常见的简化，这意味着  $H(t) = 1$ ，该控制系统称为统一反馈系统，产生函数：

$$F(t) = \frac{G(t)}{1 - G(t)}$$

### 2.4.3 嵌入式控制系统的反馈组件

实际上，在设计嵌入式控制系统时会使用特定的反馈传递函数。这些闭环传递函数特征可以通过以下方式描述：

- 瞬态行为或静态特性曲线；
- 数学方法。

对于嵌入式闭环控制系统传递函数，其动态行为的反馈规律的数学符号取决于特定控制器块的相应特性。

在实践中，以下要素是重要的：

- 比例控制；
- 积分控制；
- 衍生控制。

#### 1. 比例控制

比例控制（P 反馈）是最直接的反馈，其中控制器的输出直接随着输入（或系统误差） $x_d = u - x_R$  而变化，这导致

$$y(t) = K_p \cdot x_d(t)$$

其中  $K_p$  是比例控制的增益因子。增大  $K_p$  将增加控制系统的闭环增益，因此可用于提高控制系统响应的速度，并减小任何误差的大小。具有比例反馈的嵌入式控制系统称为系统零级或没有存储元件的系统。图 2.16 中的曲线图显示了采用步进响应作为输入的比例控制响应（见 1.1 节），固定增益为  $K_p$ 。

然而，单独的比例控制通常不够好，因为增加  $K_p$  不仅使系统更加敏感，而且也会使其更不稳定。因此， $K_p$  的增加是有限的，并且该限制可能不足以达到期望的响应。实际上，当尝

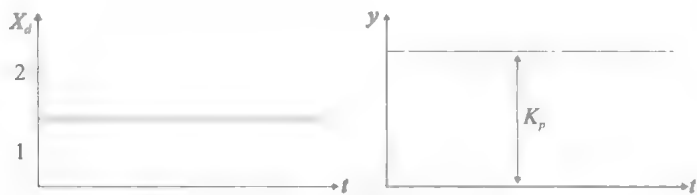


图 2.16 理想比例控制器的单位步长

试调整  $K_p$  时，可能会出现冲突的要求。一方面，旨在尽可能减少任何稳态误差，但是通过增加  $K_p$  来尝试这样做可能导致响应振荡和建立时间的延长。另一方面，对输入信号变化的响应应尽可能快，但是过冲或振荡很小。快速控制系统响应可以通过增加  $K_p$  来实现，但增加可能会使控制系统不稳定。

为了解决有关控制系统增益的矛盾，需要一个 P 控制器，它的特点是：

- $K_p$  值高，以减少控制系统的误差；
- $K_p$  值高，以确保快速反应；
- $K_p$  值足够低，以确保动态响应不会过冲，并且任何振荡趋势都能够抵消。

为了满足这些要求，P 控制器必须通过向比例部分添加一个或两个其他控制项进行扩展，例如积分控制、差分控制或积分和差分控制。

2. 积分控制

将积分控制部分添加到控制器的主要目的是消除任何稳态误差，这可以通过一个积分增益项来实现，该积分增益项实际上在零值处具有无限值，表示稳态条件。在响应速度和不稳定性不造成影响的情况下，积分控制器通常与比例和微分控制一起使用。

63

对于输出信号  $x$  和输入为  $x_d$  的时间积分，存在积分控制依赖性。控制偏差  $e$  的时间积分及系统输出（或执行变量  $y$ ）与复位时间  $T_N$  相关。复位时间称为积分因子或积分时间常数。这意味着对于在时间  $t=0$  的  $T_N=2s$  的复位时间，2s 后的输出值  $y$  已经达到恒定输入  $x_d$  的值。在集成控制器的情况下，执行器变量除了初始值之外，与控制偏差的时间积分成正比：

$$y(t) = 1/T_N * \int_0^t x_d(t) dt$$

如果积分控制元件的输入为零，则输出值不变。通过选择不等于零的恒定输入值，积分控制器输出随着恒定的增加而变化。如果输入值均匀增加，则积分控制器输出总是更快地更改。积分控制器类似比例控制器，无稳态误差。与比例控制器相比，积分控制器相对较慢。通过选择过大的复位时间  $T_N$ （比例因子  $K_I = 1/T_N$ ），存在控制变量的过冲，并且控制器变得非常不稳定。在技术上，基于软件版本的整合控制器通过在一段时间间隔内求和来实现。图 2.17 显示了在时间  $T_N = 1$  处的积分控制器对单位阶跃的响应，其中  $K_I = 1/T_N$ ， $x_d = 1$ 。

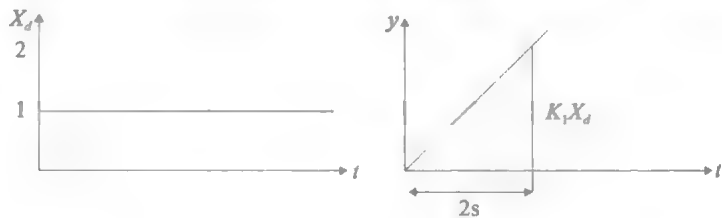


图 2.17 理想的积分控制器的单位步长

3. 微分控制

在控制器中采用微分控制来加速嵌入式控制系统的瞬态响应。微分行为总是伴随着比例控制、积分控制仅在必要时使用。由于相位的相加导致闭环控制系统，通过减少微分控制的相位增益因子，在控制器中嵌入微分动作对嵌入式控制系统具有稳定的作用。

对于微分控制，输出  $u$  与输入信号  $x_d$  的时间导数成比例。因此，执行变量  $y$  与产生的控制偏导  $\dot{x}_d$  的变化率成比例：

$$y(t) = T_v \frac{dx_d}{dt}$$

在系统输出（控制变量）突然变化的情况下，执行变量  $y$  立即增加，然后恢复到其原始值。在理想情况下，微分控制器跟随 Dirac 脉冲作为阶跃响应。纯粹的微分控制器在实践中无法实现，因为差分消除了设定点。因此，微分控制器与比例控制器或积分控制器组合使用，可以快速响应系统输出（控制变量） $x$  的突然变化。

在技术上，基于软件版本的微分控制器通过在一段时间间隔内进行微分来实现。常量  $T_v$  称为微分作用时间。图中 2.18 显示了微分控制器的单位阶跃响应，增益因子为  $K_D = T_v = 1$ 。

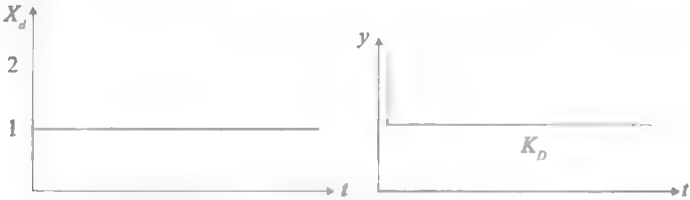


图 2.18 理想微分控制器的单位步长

4. 比例、积分和微分控制

如前所述，这些控件广泛用于控制嵌入式控制系统的响应。微分动作用于提高响应速度，而积分部分可以防止在流量或执行器位置发生稳态误差。当控制器试图将系统的输出保持在其正常的工作范围时，通常使用比例 - 积分 - 微分（PID）控制器的整体行为，并且系统输出的变化只是由于负载变化而变化。

在 PID 控制器的输入显著变化的情况下，通常关闭或抑制控制器的整体部分，直到系统的输出接近其正常工作范围为止。如果整体部分不被抑制，则 PID 控制器的输入变化大，导致嵌入式控制系统的响应产生大的振荡。因此，振荡响应与比例控制元件和导数控制元件相互作用，结果是长时间建立的嵌入式控制系统的循环响应。

使用积分控制的一般约束是仅当嵌入式控制系统策略中存在不能容忍的稳态误差时才应使用它。即使积分行为的贡献应足以消除稳态误差，但不会导致振荡的稳态响应。如果稳态误差不存在或可以容忍，则比例 - 微分控制器就足够了。

PID 控制器包含所有三种控制规律——比例、积分和微分。PID 控制器的输入为与控制器的三个并行输入端口连接的误差信号  $x_d$ ，如图 2.19 所

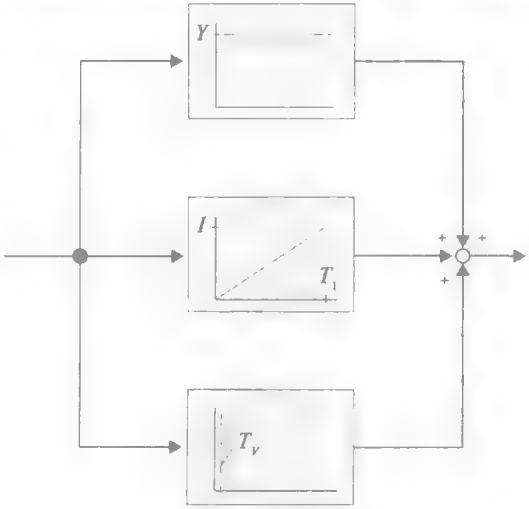


图 2.19 PID 控制器框图（详见正文）

64

65

示。PID 控制器元件的输出信号合并成一个求和点，如图 2.19 所示。求和点的输出是 PID 控制器输出的加权和。三个输出具有相同的正号，并且求和点的输入的加权因子在图 2.19 中假设为值 1。常量  $T_i$  表示积分元件的复位时间， $T_d$  表示微分元件的微分执行时间。

从图 2.19 可以推导出以下等式：

$$y(t) = K_p * x_d + K_i * \int_{t_0}^t x_d(\tau) d\tau + K_d * \frac{dx_d}{dt} + x_d(0)$$

其中  $x_d(0)$  为初始值， $K_p$  为比例项的增益因子， $T_i = 1/K_i$  为  $T_i$  作为复位时间的积分控制器增益系数， $T_d$  是微分控制器增益因子。在排除  $K_p$  之后，关于边界条件  $x_d(0) = (0)$ ，有：

$$y(t) = K_p(x_d + \frac{T_i}{K_p} * \int_{t_0}^t x_d(\tau) d\tau + \frac{K_d}{K_p} * \frac{dx_d}{dt})$$

对于

$$\frac{K_p}{T_i} = T_N$$

和

$$\frac{K_d}{K_p} = T_v$$

最后得到：

$$y(t) = K_p(x_d + \frac{1}{T_N} * \int_{t_0}^t x_d(\tau) d\tau + T_v * \frac{dx_d}{dt})$$

使用拉普拉斯变换，上述等式可以用  $s$  表示为拉普拉斯算子，得到

$$G(s) = K_p(1 + \frac{1}{s * T_N} + s * T_v)$$

对于一些计算，将上述加法形式重写为以下乘法形式可能更合适：

$$G(s) = K_p * \frac{(1 + s + T_i)(1 + s * T_2)}{s + T_N}$$

系数为：

$$T_1 = \frac{T_N}{2} \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{4T_v}{T_N}} \right)$$

$$T_2 = \frac{T_N}{2} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{4T_v}{T_N}} \right)$$

其中  $T_N > 4 * T_v$ 。从  $T_N > 5 * T_v$ ，可以找到以下关系：

$$T_1 = T_N$$

$$T_2 = T_i$$

从上述等式可以看出，PID 控制器具有两个零元素和在  $s$  平面原点的极点。PID 控制器的增益因子  $K_p$ 、 $T_i$  和  $T_d$  可以使用在梯度响应的拐点处的切线计算，横坐标为下辅助变量  $T_t$ ，切线与  $5\tau$  值的交点作为顶部辅助变量  $T_g$  的阶跃响应，如图 2.20 所示。

从图 2.20 可以读取横坐标时间  $t$  所示的  $T_t$  和  $T_g$  的对应值。让 PID 控制器超过辅助变量  $O_{max}$  的商，对于  $T_{95}$  时的最大过冲高度，描述了 PID 控制器的默认值：

$$K_p = \frac{T_{95}}{\ddot{U}_{max}} * \frac{T_g}{T_t}$$

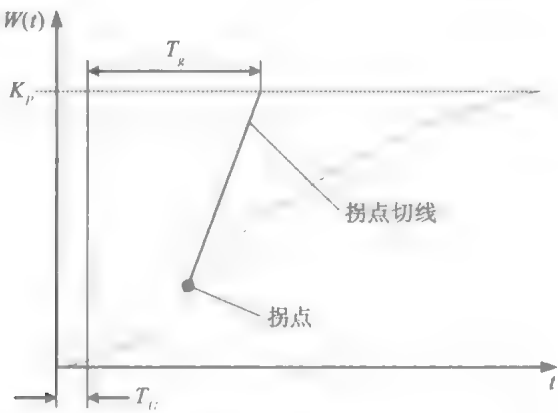


图 2.20 阶跃响应的瞬态行为（详见正文）

假设 PID 控制器在下列公式中不允许超出在以上介绍的辅助变量结果：

$$K_p = \frac{T_{60}}{K_s} * \frac{T_g}{T_i}$$
$$T_v = T_e$$
$$2 * T_v = T_l$$

理想的 PID 控制器是理想的比例、积分和微分控制器的并联连接，其通过添加各个传递函数表示如下：

$$g(t) = K_p + \frac{K_p}{T_N} * t + K_p * T_v * \delta(t)$$

68

上面给出的理想 PID 控制器的传递函数  $g(t)$  如图 2.21 所示

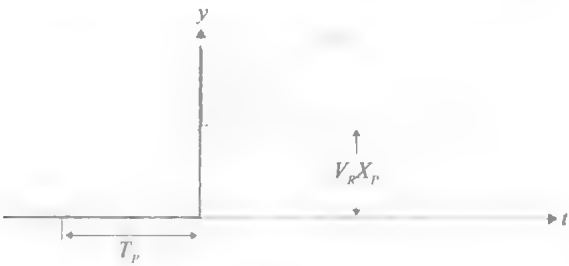


图 2.21 理想 PID 控制器的传递函数

在设计控制器时，通常会使用仿真程序来优化控制器设计。这可以基于行业标准软件包 MATLAB Simulink（Chaturvedi 2010）完成。

2.5 软硬件协同设计

软硬件协同设计起始于 20 世纪 90 年代初，是一种设计复杂数字系统的新方法。当时硬件和软件的并行设计已经是一种常规业务了，设计人员在决定如何设计硬件和软件之间的接口方面需要进行细致的工作。这涉及硬件架构的定义和实现，但并没有有意识地视为协同设计。然而，它激发和刺激了今天的协同设计方法已经尝试完成的研究目标（Teich 2012）：

- 满足系统级设计（SLD）自动化的需要；
- 允许开发正确的数字系统，包括数亿个晶体管，运行数百万行程序代码

由于技术进步，软硬件协同设计已成为当今成功的数字系统设计的关键技术，并且在开发

中越来越多地使用，例如嵌入式计算系统或具有特定目标架构的更通用的信息系统。

软硬件协同设计的主要目的和意图可以通过对英文前缀（co）的不同解释来介绍（Teich 2012）。

- 协调（Coordination）：协同设计技术用于协调跨学科设计组的设计步骤，涉及软件方面的固件操作系统应用程序开发人员，以及硬件方面的硬件开发人员和芯片设计人员，以协调所有部分的系统。
- 并发性（Concurrency）：紧迫的上市时间窗口迫使硬件和软件开发人员在硬件架构可用之后并发地工作，而不是按顺序启动固件、软件开发以及测试。协同设计通过从可执行规范或应用虚拟平台的概念或虚拟原型开发开始，提供了巨大的进步来避免这个设计瓶颈，以便从早期阶段在架构的仿真模型上运行并发开发的软件。此外，同时执行的软件和硬件组件的测试和分割需要特殊的协同技术来反映子系统的并发和同步。
- 正确性（Correctness）：复杂的硬件和软件技术的正确性挑战不仅需要验证每个子系统的正确性，而且还需要在整合之后对其正确的交互进行测试。
- 复杂性（Complexity）：协同设计技术主要由当今数字系统设计的复杂性驱动，并作为缩小已知设计差距并产生正确工作、高度优化（例如成本、功耗或性能）的系统的实现手段。

69

此外，软硬件协同设计的方法可以通过对英文前缀 co 的其他解释来介绍：

- 协同综合（Cosynthesis）：基于应用领域通信的最小化，对可使用硬件或软件的域进行标记；
- 协同仿真（Cosimulation）：基于分区审查模式，允许早期系统的逻辑功能和行为审查；
- 协同测试（Cotest）：由用户设置，因为硬件测试方法和软件指标都不包含特定应用的测试方法。

协作方法的潜在结果是：

- 设计阶段的抽象系统等级；
- 非常复杂的系统和高性能标准；
- 设计和生产上市时间短；
- 具有标准微处理控制器组件、PC、单片解决方案、DSP 等的系统；
- 具有专用硬件的系统，例如 ASIC、ASP、DSP、FPGA 等；
- 具有特定软件的系统；
- 许多综合应用。

这要求可用的技术支持软硬件协同设计的复杂性管理：

- 硬件 - 软件分割；
  - 如果可能的话，推迟设计约束的决策；
- 抽象和分解技术；
- 增量开发；
  - 开发软件需要自顶向下的设计；
- 描述语言；
- 仿真；
- 标准；
- 设计方法管理框架。

70

目前的软硬件协同设计过程包括：

- 设计过程的基本特征：
  - 系统立即划分为硬件和软件组件；
  - 硬件和软件分开开发；
  - 通常采用硬件作为首选方法。
- 这些特征的含义是：
  - 硬件和软件权衡受到限制；
  - 硬件和软件的相互影响不易评估；
  - 推迟的系统集成。
- 关于这些特征的设计结果是：
  - 低质量设计；
  - 修改成本高；
  - 日程延误。

因此，嵌入式计算系统的协同设计过程可以描述如下：

- 系统设计流程，从硬件和软件的角度，从最早阶段开始，利用设计的灵活性和高效的功能分配；
- 使用硬件和软件组件实现系统的集成设计。

因此，协同设计过程的关键概念包括：

- 并行：可以在并行路径上同时开发硬件和软件；
- 集成：硬件和软件开发之间的交互，以产生符合性能标准和功能规范的设计。

71 关于上述情况，可以将协同设计过程的要求分类为：

- 统一表示
  - 支持硬件和软件的统一设计和分析技术；
  - 在综合设计环境中进行评估。
- 迭代分割技术
  - 评估不同的设计（硬件和软件分割）；
  - 确定系统设计的最佳实施方法；
  - 分割模块以最好地满足设计标准（功能和性能目标）。
- 连续和增量评估
  - 在设计过程的几个阶段支持评估；
  - 可由集成建模基板提供。

由此可以看出，在系统级别的协同设计方法中，在需求说明期间，必须创建整个系统的可执行规范。在初始阶段，以下行动项目至关重要：

- 描述系统功能；
- 记录设计过程的所有步骤；
- 自动验证关键系统功能的属性；
- 分析和探索实施方案；
- 综合子系统；
- 更改/使用已有的设计。

除了规范、形式分析以及协同工具的性能和成本分析的必要性之外，很快会发现数字系统协同设计中的综合问题涉及三个主要任务（Teich 2012）。

- 分配：定义为选择一组系统资源，包括处理器/控制器和硬件模块及其互连网络，从而



- 在资源方面构成系统架构。这些资源可以作为库模板存在，或者设计流程应该能够合成它们；
- 绑定：定义为将功能映射到处理资源和变量，将数据结构映射到内存和相应资源之间的通信路由；
  - 调度：定义为确保功能在适当的资源上执行，包括功能执行、内存访问和通信。这可能涉及部分执行顺序的定义或每个处理器/控制器的调度器的规范以及所涉及的通信和存储器资源及任务优先级等。

因此，协同设计自动完成必要的设计改进，节省开发时间，并允许在系统级快速验证上述设计（Lee and Seisha2015），在文献（Teich 2012）介绍的双层屋顶模型中，如图 2. 22 所示，根据文献（Haubelt and Teich 2010；Teich 2000）的描述，描绘了数字设计自动化的典型抽象级别，从图 2. 22 可以看出：

- 模块级的模型描述复杂模块的功能和交互；
- 块级的模型描述了在提供的硬件架构基本操作执行的程序指令

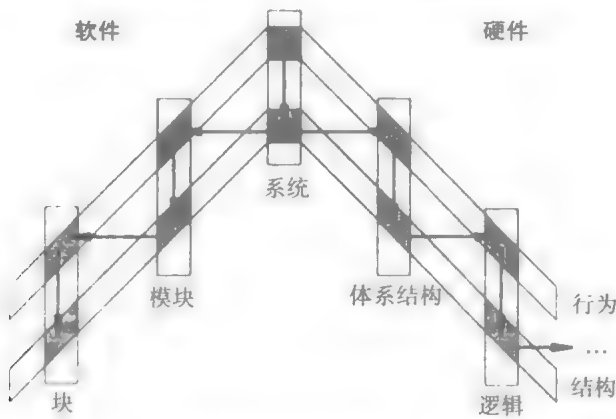


图 2. 22 文献（Teich 2012）引入的双层屋顶模型，显示了通过连续综合优化（垂直箭头）连接软件（左）和硬件开发链（右）的顶部系统级别。每个综合步骤将功能规范映射到下一个较低抽象级别的结构实现

除了引用抽象级别的模型分类外，抽象级别的差异导致：

- 行为：描述独立于具体实现的功能；
- 结构：描述通信组件、故障和通信，并代表实际的实现。

## 2.6 案例研究：基于 FPGA 的 CPU 内核

案例研究侧重于基于 FPGA 的中央处理单元（CPU）设计。设计目标是基于 FPGA 核心的 CPU 核心，其数据应具有 4 位和 12 位宽的地址总线。CPU 内核有两个用户可访问的寄存器、一个累加器和一个索引寄存器，均为 4 位宽。对于内部组织，需要更多的寄存器，例如 12 位宽的程序计数器（PC）和地址寄存器，8 位宽的指令寄存器（见图 2. 23）。CPU 核心周期由硬连线控制单元控制。由于所选 FPGA 不具有三态逻辑总线，因此必须由多路复用器实现。通过 FPGA 的连接器引脚，假设以下信号是外部可访问的：

- 电源（+5V）和地线（GND）；
- 存储器输出的地址总线输出信号；
- 用于读写内存的双向数据总线；

- 复位线；
- 能区分读写的写入内存线。

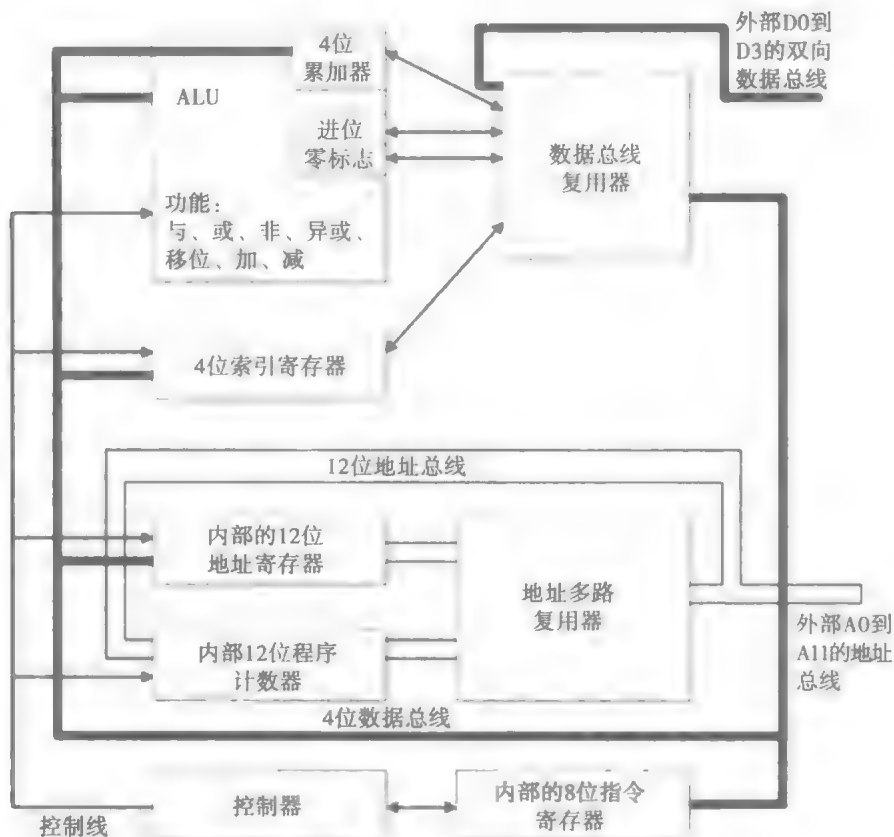


图 2.23 基于 FPGA 的 CPU 的示意图

为了便于测试，将累加器、索引寄存器和内部计数器的内容转移到外部。在单个 FPGA 中实现 CPU 内核，消除了多个设备的功能单元之间昂贵的通信。只有地址总线和数据总线可供所有单元使用。

由于仅需要执行寄存器和多路复用器的控制线，所以控制器可以实现为紧凑块。算术逻辑单元应具有以下特征：

- 通过进位标志将累加器向右旋转；
- 通过进位标志将累加器向左旋转；
- 维护中的累加器与数据总线上存在的值的逻辑异或；
- 电池容量逻辑非；
- 电池容量与数据总线上存在的值的逻辑与；
- 电池容量与数据总线上存在的值的逻辑或；
- 考虑到进位标志，从电池欠载中减去数据总线上存在的值；
- 考虑到进位标志，增加数据总线架构上存在的值。

累加器始终是第一个操作数，第二个操作数在数据总线上可用。为释放控制单元，将累加器集成到 ALU 中，ALU 确保在算术运算完成后将结果写入累加器。控制单元显示控制线上算术运算的开始。FPGA 结构中的设计选项如图 2.24 所示。由于所使用的 FPGA 架构没有总线结构，所以功能的选择由多路复用器实现。所有功能块如图 2.24 所示。控制单元的控制线只决

定是否/应该写什么结果。ALU 的八个功能组合成两组，因为两个功能可以同时存储在逻辑单元中，用于操作数的 1 位，从而将空间需求减少了 50%。更详细地，这只是加法器/减法器块，与其中加法器完全解码的可编程逻辑块相反，在设计实例中，使用 ripple-carry 加法器，使进位操作从位传递到位。这增加了加法器计算正确结果所需的时间，但节省了空间。因此，每个位只有两个宏单元可以用于 ripple-carry 加法器。

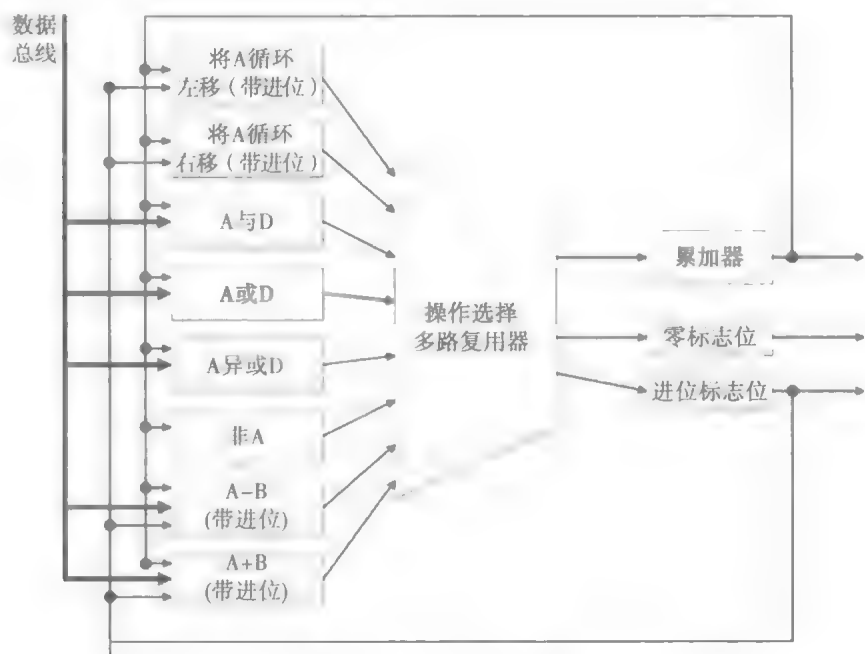


图 2.24 ALU 的示意图

关于基于现有处理器的指令集的 4 位 CPU 和 FPGA 内核的设计要求，从 8 位 CPU 6502 的指令集中选择了最小集。选择的指令集包括以下的指令组和指令

- 传输指令：LDA LDX STA STX TAX TXA；
- 算术指令：AND OR XOR ADD SUB ROL ROR NOT；
- 分支指令：JMP JC JNC JZ JNZ JXZ JXNZ；
- 其他指令：NOP CLC DEX。

6502 微处理器系列指令集的扩展是根据 X 寄存器的值允许分支的命令 JXZ 和 JXNZ。指令字存储在存储器中的两个部分，即高和低半字节。在指令解码的三个阶段，产生一个 22 位宽的控制字的相应序列。表 2.1 包含每个指令的十六进制代码（具有所有寻址模式），以及有关实现和持续时间（循环）的信息。

根据表 2.1 中的表格程序表示，完成 FPGA CPU 内核的详细概念设计。此后，必须完成 FPGA 的编程和实现测试的原型。测试是必要的，因为在下一个编程过程中，可能不总是完全验证模块的正确编程。为此，必须建立与 FPGA CPU 内核的简单测试环境。测试环境由 FPGA CPU 内核、EPROM、静态 RAM 芯片、GAL 和石英晶体组成。输入输出功能的复位由 GAL 实现。测试环境可以由石英晶体振荡器或具有时钟的单步电路供电。测试硬件具有复位按钮，以在定义的状态下访问 CPU 内核。通过 DIP 开关，可以选择存储在 EPROM 中的一个测试程序。此外，测试环境有 7 段显示，显示累加器、索引寄存器、指令寄存器、地址总线和包含显示器的数据总线的内容，从而可以通过逐个时钟周期对单个命令进行处理。

表 2.1 4 位 CPU 的指令集

指令	地址模式	存储模式		执行	持续时间
		码	操作数		
LDA	inh	10h	-	$(O) \rightarrow A$	4
	imm	50h	i		5
	dir	90h	iii		7
	idx	D0h	iii		7
LDX	inh	11h	-	$(O) \rightarrow X$	4
	imm	51h	i		5
	dir	91h	iii		7
	idx	D1h	iii		7
STA	dir	92h	iii	$(A) \rightarrow O$	9
	idx	D2h	iii		9
TAX	inh	02h	-	$(A)$	6
TXA	inh	03h	-	$(X) \rightarrow A$	4
AND	inh	0Ch	-	$(A) \cdot (O) \rightarrow A$	4
	imm	4Ch	i		5
	dir	8Ch	iii		7
	idx	CCh	iii		7
OR	inh	0Dh	-	$(A) + (O) \rightarrow A$	4
	imm	4Dh	i		5
	dir	8Dh	iii		7
	idx	Cdh	iii		7
XOR	inh	0Ah	-	$(A) \oplus (O) \rightarrow A$	4
	imm	4Ah	i		5
	dir	8Ah	iii		7
	idx	CAh	iii		7
ADD	inh	0Fh	-	$(A) + (O) \rightarrow A$	4
	imm	4Fh	i		5
	dir	8Fh	iii		7
	idx	CFh	iii		7
SUB	inh	0Eh	-	$(A) - (O) \rightarrow A$	4
	imm	4Eh	i		5
	dir	8Eh	iii		7
	idx	CEh	iii		7
ROL	inh	09h	-		4
	imm	49h	i		5
	dir	89h	iii		7
	idx	C9h	iii		7
ROR	inh	08h	-		4
	imm	48h	i		5
	dir	88h	iii		7
	idx	C8h	iii		7

(续)

指令	地址模式	存储模式		执行	持续时间
		码	操作数		
NOT	inh	04h	-	$\emptyset(A) \rightarrow A$	4
JMP	dir	98h	iii	$(O) \rightarrow PC$	7
	idx	D8h	iii		7
JC	dir	9Ah	iii	$?c = 1; (O) \rightarrow PC$	7
	idx	Dah	iii		7
JZ	dir	9Bh	iii	$?z = 1; (O) \rightarrow PC$	7
	idx	Dbh	iii		7
JNC	dir	9Eh	iii	$?c = 0; (O) \rightarrow PC$	7
	idx	DEh	iii		7
JNZ	dir	9Fh	iii	$?z = 0; (O) \rightarrow PC$	7
	idx	Dfh	iii		7
JXZ	dir	99h	iii	$?X = 0h; (O) \rightarrow PC$	7
	idx	Ddh	iii		7
JXNZ	dir	9Dh	iii	$?X \neq 0h; (O) \rightarrow PC$	7
	idx	Ddh	iii		7
NOP	inh	00h	-	-	4
CLC	inh	01h	-	$0 \rightarrow c$	4
DEX	inh	07h	-	$(X) - 1 \rightarrow X$	4

2.7 练习

1. 术语嵌入式计算系统是什么意思？

2. 描述嵌入式计算系统的架构。

3. 术语设计指标是什么意思？

4. 举一个设计指标的例子。

5. ECS 设计中的异质性是什么意思？

6. 给出 ECS 设计中异质性的一个例子。

7. ECS 设计中术语一致性是什么意思？

8. 举例说明 ECS 设计的一致性。

9. 术语硬实时要求是什么意思？

10. 举一个硬实时要求的例子。

11. 术语软实时要求是什么意思？

12. 举一个软实时要求的例子。

13. 术语嵌入式控制是什么意思？

14. 描述嵌入式控制系统的结构。

15. 术语开环控制系统是什么意思？

16. 描述开环控制系统的影响。

17. 术语闭环控制系统是什么意思？

18. 描述闭环控制系统的影响。

19. 术语误差检测器是什么意思？

20. 描述误差检测器的影响。

21. 术语比例控制器是什么意思？

22. 描述比例控制器的结构。

23. 术语积分控制器是什么意思？

24. 举一个积分控制器的例子。

25. 术语微分控制器的含义是什么？

26. 举一个微分控制器的例子。

27. 术语过冲是什么意思？

28. 举一个过冲的例子。

29. PID 控制器是什么意思？

30. 描述 PID 时间响应特性的影响。

31. 术语软硬件协同设计是什么意思？

32. 举一个软硬件协同设计的例子。

33. 术语协同设计是什么意思？

34. 描述协同设计的过程。

35. 目标架构一词是什么意思？

36. 举一个目标架构的例子。

37. 目前的 HW/SW 设计流程是什么？

38. 举例说明当前 HW/SW 设计的工作流程。

## 参考文献

- (Adamski et al. 2005) Adamski, M., A., Karatkevich, A., Wegrzyn, M.: Design of Embedded Control Systems, Springer Publ. 2005
- (Ashenden 2008) Ashenden P. J.: The Designers Guide to VHDL, Elsevier Publ. 2008
- (Balarin et al. 2003) Balarin, F.: Metropolis: An Integrated Electronic \ Environment, Computer, pp. 45–52, 2003
- (Balasubramanian et al. 2006) Balasubramanian, K.: Developing Applications Using Model-Driven Design Environments, Computer, pp. 33–40, 2006
- (Booch et al. 2005) Booch, G., Rumbaugh, J., Jacobsen, I.: The Unified Modeling Language User Guide, Pearson Higher Education Publ. 2005
- (Chaturvedi 2010) Chaturvedi, D. K.: Modeling and Simulation of Systems Using MATLAB and Simulink, CRC Press, 2010
- (Colnaric and Verber 2008) Colnaric, M., Verber, D.: Distributed Embedded Control Systems, Springer Publ. 2008
- (Eker et al. 2003) Eker, J.: Taming Heterogeneity: The Ptolemy Approach, Proc. IEEE, Vol. 91, no. 1, pp. 127–144, 2005
- (Feiler and Gluch 2012) Feiler, P. H., Gluch, D. P.: Model-based Engineering with AADL: An Introduction to the SAE Architecture Analysis and Design Language, Pearson Higher Education Publ., 2012
- (Haubelt and Teich 2010) Haubelt, C., Teich, J.: Digital Hardware/Software-Systems: Specification and Verification (In German), Springer Publ. 2010
- (Henzinger and Sifakis 2007) Henzinger T. A., Sifakis, J.: Embedded Systems Design, IEEE Computer Society, pp. 32–40, 2007
- (Kamal 2008) Kamal, R.: Embedded Systems: Architecture, Programming, and Design, McGraw Hill Publ. 2008
- (Klee Allen 2011) Klee H., Allen, R.: Simulation of Dynamic Systems with Matlab and Simulink, CRC Press, 2011
- (Lee and Seisha 2015) Lee, E. A.; Seshia, S. A.: Introduction to Embedded Systems: A Cyber-Physical Systems Approach, 2nd ed. Berkeley, CA, USA, 2015
- (Moeller 2003) Moeller, D. P. F.: Mathematical and Computational Modeling and Simulation, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2003
- (Möller 2014) Möller D. P. F.: Introduction to Transportation Analysis, Modeling and Simulation, Springer Publ. Series Simulation Foundations, Methods, and Applications, 2014
- (Oliveira, M. F. S., Redin, R. M., Carro, L., da Cunha Lamb, L., Wagner, F. R.: Software Quality Metrics and their Impact on Embedded Software. In: IEEE MOMPES 5th Internat. Workshop, pp. 68–77, 2008,
- (Perry 2002) Perry, D. L.: VHDL Programming by Example, McGraw Hill, 2002
- (Plessel 2013) Plessel, C.: Hardware/Software Codesign: <http://homepages.uni-paderborn.de/plessl/lectures/2010-Codesign/script/Skript-Codesign.pdf>. Accessed August 18, 2013
- (Rockwell 2010) Rockwell, D.: State-Space Representation of LTI Systems, <http://web.mit.edu/2.14/www/Handouts/StateSpace.pdf>
- (Rumbaugh et al. 2004) Rumbaugh, J., Jacobsen, I., Booch, G.: The Unified Modeling Reference Language Manual, Pearson Higher Education Publ., 2004
- (Sciuto et al. 2003) Sciuto, D., Salice, F., Pomante, L., Fornaciari, W. : Metrics for Design Space Exploration of Heterogeneous Multiprocessor Embedded Systems. [http://pdl.aminer.org/000/106/293/metrics\\_for\\_design\\_space\\_exploration\\_of\\_heterogeneous\\_multiprocessor\\_embedded\\_systems.pdf](http://pdl.aminer.org/000/106/293/metrics_for_design_space_exploration_of_heterogeneous_multiprocessor_embedded_systems.pdf)
- (Sifakis 2005) Sifakis J.: A Framework for Component-Based Construction, Proc. Software Eng. and Formal Methods, IEEE, pp. 293–300, 2005
- (Teich 2000) Teich, J.: Embedded system synthesis and optimization. In: Proc. Workshop Systems Design Automation, pp. 9–22, Rathen, Germany, 2000
- (Teich 2012) Teich, J.: Hardware/Software Codesign: The Past, the Present, and Predicting the Future; Proceedings of the IEEE, Vol. 100, pp. 1411–1430, 2012
- (Vahid and Lysecky 2007) Vahid, F., Lysecky, R.: Verilog for Digital Design, John Wiley Publ. 2007
- (Visioli 2006) Visioli, A.: Practical PID Control, Springer Publ. 2006
- (Zurawski 2009) Zurak, R.: Embedded Systems Handbook, CRC Publ., 2009

# 信息物理系统概述

本章 3.1 节结合第 1 章的系统以及第 2 章的嵌入式计算机系统对信息物理系统进行介绍。接下来, 3.2 节介绍了信息物理系统的设计要求。3.3 节对信息物理系统的需求进行了描述, 并引出一种系统设计方法。3.4 节介绍了信息物理系统在各领域中的广泛应用情况, 为许多产品和应用提供了新的机会。3.5 节介绍了智慧城市和万物互联的概念。3.6 节提供了一个信息物理系统应用于车辆追踪的研究案例。3.7 节包含了信息物理系统的相关问题。本章最后附上了参考文献和阅读建议。

## 3.1 信息物理系统

本书的第 1 章对系统进行了具体介绍, 使得不同学科和工作背景的读者对系统的术语以及其数学背景有相同的理解。第 2 章介绍了嵌入式计算系统, 这些系统具有专门的功能, 用于大型和/或异构系统架构中, 并通常要保证实时性约束。嵌入式计算系统与网络计算的集成催生了新一代的工程系统, 即所谓的信息物理系统 (cyber-physical system, CPS), 它们代表通过物理手段控制和交互的设备完全封装计算机的物理系统。这些系统通过计算指令和一些通信手段将新的物理系统的功能嵌入到物理过程中, 并与其进行交互。因此, 本章基于之前所介绍的知识并结合以下相关概念或技术对信息物理系统做介绍:

- 集成计算单元来控制物理实体的系统;
- 具有物理输入和输出的交互单元组成的网络;
- 物联网、数据和服务;
- 物理模型和虚拟世界模型之间的互连;
- 具有自主行为的能力, 如自我控制和/或自我优化;
- 基于网络的商业模式、社交网络和社区;
- 系统中的系统;
- 分布式智能网络设备与人类合作的新途径。

根据这些定义我们可以知道, 信息物理系统应用的范围由小及大, 极其广泛, 例如, 从小尺度的心脏起搏器到大规模的电力网络, 这些到处存在的计算设备是一种促进经济发展的巨大资源。

在信息物理系统发展的历史中, 美国国家科学基金委员会 (NSF) 于 2006 年已经确定信息物理系统将会成为未来一个非常有前景的研究主题。在接下来的 1 年, 经总统科技顾问委员会 (PCAST) (PCAST 2007) 的推荐, 美国国家科学基金委员会建立了一个名为信息物理系统的研究规划, 已资助其中约 65 个项目, 资助经费总额近 6000 万美元。在总统科技顾问委员会随后的 2010 年的报告中, 对信息物理系统的进一步研究被提上日程, 相关的 NSF 项目延长至 2013 年, 其预算超过 3000 万美元。

在 2012 年, 德国科学和工程院 (acatech) 发布了一个由德国联邦教育与研究部 (BMBF) 资助的关于信息和通信技术 (ICT) 的研究项目, 而随着物联网大趋势的到来, 信息物理系统也面临着技术方面的众多机遇和挑战 (Geisberger and Broy 2012)。

根据这些研究, 信息物理系统将在工业和社会中发挥重要作用, 以信息物理系统为桥梁连



接各个相关领域的行为，从而在相关领域取得突破。能完成这些目标的原因是信息物理系统的复杂性远超应用于工业中的传统系统（见第1章和第2章），例如自动化系统，这需要更紧密地将适当的系统和软件工程规范通过网络联系起来。传统的自动化系统网络是通过专门开发的网络结构实现的，例如总线（过程现场总线）、DP（分散的外围设备），通常应用于生产自动化领域，通过集中控制来操作传感器和执行器，又如，PA（过程自动化），通常用于过程自动化应用，通过过程控制系统监视测量设备。相比之下，信息物理系统通常使用开放的网络技术，比如因特网。互联网重大的发展是以物联网（IoT）（见第4章，Möller 2013）为重要特征的，它使得现实世界和虚拟世界逐渐走向融合。因此，基于融合的真实（物理）和虚拟（网络）系统的信息物理系统，在嵌入式计算系统（见第2章）和信息和通信技术的组件（ICT）的网络化以及互联网或者说物联网中的重要性在逐渐提高。其中，物联网是一个动态的全球网络基础设施，具有基于标准的自配置能力和互相操作的通信协议，即互联网协议第6版（IPv6）。IPv6是解决互联网传输拥堵的最新版本的协议。它由互联网工程工作组开发，用以取代IPv4，克服预期的IPv4地址耗尽的问题。IPv6允许访问 $2^{128}$ 个地址，IPv6的规范可以在文献（http1 2015）找到。IPv6寻址体系结构可以在文献（http2 2015）找到。该文档包括IPv6寻址模型、IPv6地址的文本表示以及IPv6单播地址、选播地址、多播地址和IPv6节点所需的地址。

信息物理系统的复杂性远超应用于工业中的传统系统，同时需要与适当的学科紧密联系。这使得三个基本技术对信息物理系统至关重要：

- 嵌入式计算系统（ECS）；
- 网络、信息和通信技术（NICT）；
- 传感和执行技术（SAT）。

因此，计算、网络化和传感成本的降低为网络、信息和通信技术在各个行业和应用领域提供了基本的经济动力。此外，计算能力的指数式增长使众多高性能的计算机进入了市场。同样的趋势大大地提高了传感和执行技术。因此，计算机和通信技术已经成为使大型系统集成在一起的通用的系统集成器，能够组成信息物理系统的基础设施。因此，信息物理系统有一个先进而复杂的系统架构，将计算、网络、物理和网络或虚拟环境连接在一个范式之中。它提供以下服务：

- 控制；
- 信息反馈；
- 实时监测。

通过将计算、通信和控制（3C）结合，以此作为融合物理和网络世界的相互作用的基本行为（Ning 2013）。

在技术创新的背景下，可以说，信息物理系统和物联网彼此有许多相似之处。两者都是通过传感、执行、计算、信息传输和交互技术来整合信息和物理世界。但两者现在也有一些被承认的差异。物联网强调事物与网络的联系，而信息物理系统强调计算和物理单元的信息间的整合（Li et al. 2011）。关于这个说法，普适计算（见第5章）是至关重要的，通过互连系统产生可以提供无所不在服务的架构，它不仅支持全球的普适性，同时支持基于上下文的普适性，可以支持位置访问和大容量的访问，可以减少自动化中的人际交互。因此，信息物理系统指的是通过普遍存在的传感器进行感知和普遍存在的计算机的预处理将物理和信息世界整合。因此，信息物理系统的体系结构应该是普遍存在的和/或集成的一些范例，例如

- 环境智能（ambient intelligence）：指的是电子环境灵敏，而且对事物/物体的存在十分敏感。在一个环境智能的世界里，设备协同工作，支持人们完成任务和日常生活活动等。简单地利用隐藏在网络中的信息和智能，通过物联网技术将这些设备连接起来并

- 进行计算，这使得大量的计算机、传感器、执行器和无线电模块联网互相通信
- 消失的电脑：指设备的小型化以及与其环境的集成。因此，设备会在我们周围的环境中消失，而用户能感知到的只有用户界面（Seitz et al. 2007）。
  - 普及计算（pervasive computing）：经常称为普适计算（ubiquitous computing）的同义词，描述了一个在 21 世纪的带来革命的新兴计算模型。
  - 后 PC 时代：个人电脑销量下降，有利于移动设备，如智能手机和平板电脑等后 PC 设备的兴起。这些设备强调移动性和连接性，包括云服务，将应用程序更集中地执行任务，以及无缝地在多个设备之间同步信息的能力。
  - 无所不在的计算或普适计算：软件和计算机工程的概念，计算机在任何地方随处可见。与桌面计算相比，普适计算可以在任何位置使用任何设备进行任何形式的计算（见第 5 章）。

因此，信息物理系统通常与其他相关概念相融合，例如，通过传感器和传感器网络引出的传感概念，由执行机构以及执行器网络引出的执行概念，采用网络系统的行为算法，本体与互联信息物理系统的应用的连结，以及互操作性标准和符合人体工程学与相应的情景性的人机界面（HMI）。通过嵌入式计算系统与信息物理系统的比较，可以说信息物理网络是计算与通信的结合，伴随着物理与虚拟过程，客观地传达物理世界间的交互过程来监视和控制其物理过程，其物理过程往往存在着影响计算的反馈回路，反之亦然。因此，信息物理系统具有许多好处：它们可以使系统更安全、更高效；它们可以降低建造和操作这些系统的成本；它们可以允许许多单个机器协同工作，形成一个复杂的系统并提供新的功能。

要完成这个系统，需要理解动态计算机、软件、网络以及物理和虚拟或信息的过程（Pellizzoni 2015），并通过这些过程创造一个具有动态复杂性和高依赖性的新装置。此外，它能够将信息物理系统的原则通过可靠且经济的方式应用于新的工业和应用。

因此，随着技术的巩固与进步，使得嵌入式计算系统进一步发展为网络化的嵌入式计算系统。这种系统能够支持信息物理系统将数据与服务分布在网络上。如图 3.1 所示，展示了（Geisberger and Broy 2012）报告的结果。

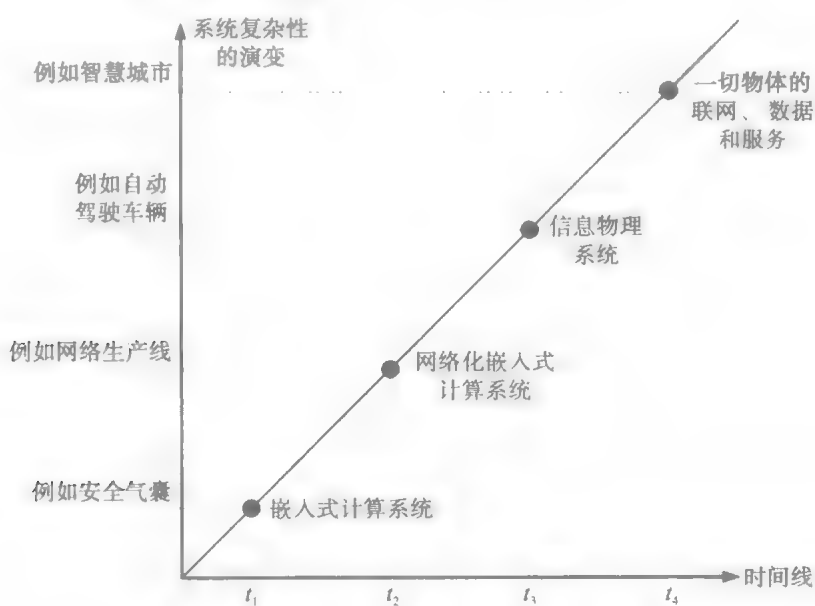


图 3.1 ECS 到物联网、数据和服务的演进过程

近二十年来，数字革命的方向发生了变化，这场革命已经改变了工业界。这个变化无关于

选择, 它将持续受到基础且长期的技术和经济的影响。因此, 由于信息物理系统受到经济与技术的影响而导致国际上产生了改变工业形式的活动。它所面临的挑战有

- 工业 4.0 (见第 7 章): 2013 年 4 月由德国发起的平台工业 4.0;
- 高级制造业: 由美国政府倡议和资助的计划;
- 智能制造领导联盟 (Smart Manufacturing Leadership Coalition): 成立于 2012 的非营利组织;
- 智能制造: 于 2012 年 3 月发布由中国科技部推动的国家计划;
- 欧盟也在工业技术计划的地平线 2020 计划中启动了类似的项目, 该项目专注于关键的可实现的技术, 例如先进制造业和加工业 (生产技术), 以及英国政府的制造业的未来规划, 及其他项目。

因此, 信息物理系统被指定为先进制造业的核心技术 (工业 4.0; 见第 7 章)。今天的工业自动化系统已经成为在制造业系统中智能化的、可勘探的、自我解释的、自我认知的、自我诊断的和可交互的资产, 它们将成为上下文敏感的、自动决策的和自动优化的制造业系统以及其资源的基础, 通常使用普适的即插即用的生产范式。在系统的级别上, 信息物理系统通过无处不在的信息网络进行通信映射普通物理对象和对应的虚拟对象, 因此算法、服务、服务的动态集成和服务的提供者以及它们的信息交换将会跨越各自的边界。

在信息层面上, 它可存在于云端以及信息物理系统和工业 4.0 的内嵌云计算中, 数据是通过是任意的、可变的信息网络收集的, 还可以表现为三维模型和仿真模型、文档、关系和工作条件等, 更多的信息则是通过无处不在、随处可见的云计算收集的。

普适计算是无处不在的, 与此同时, 其意味着嵌入式计算成为当今生活的一个不可见的部分。微型的计算设备要想消失在环境中, 需要引入普适计算的概念来为各种各样的设备集合创造一个全新的计算环境的范例。这种集合包括嵌入隐形计算机的各种日常物品, 例如, 自动化设备、瓶罐、衣服、杯子、家居设备、移动设备、个人设备、安全设备、汽车、墙壁大小的设备、可穿戴设备以及坐落在环境、建筑、安全区域、生产设施的各种设备等。

云计算是对计算资源的效用和消耗的隐喻, 它包括部署远程服务器和软件网络组, 允许数据集中存储和联机访问计算机服务或资源。

从物理过程与软件和网络的动态结合可以看出一个典型的信息物理系统的主要整合部分。正如文献 (http3 2015) 所提到的, 该整合部分提供了抽象、建模、设计以及对整体分析的技术。最后会形成一幅信息物理系统的概念图, 如图 3.2 所示。

从图 3.2 可以看出, 信息物理系统主要为一门工程学科, 侧重于技术, 而且需要强大的数学抽象基础。技术所面临的挑战是对物理过程抽象模型的建立, 就像微分方程、随机过程以及在计算机科学中关于算法和程序的抽象模型, 提供程序的认识论 (Abelson and Sussman 1996)。以前的抽象关注于系统状态随时间的动态演化, 而后者则侧重于转换数据的过程。计算机科学把核心物理特性抽象出来, 特别是在物质世界中某个领域的动态演化所经历的时间 (http3 2015)。因此, 信息物理系统具有如下基本特征。

- 性能: 主要在控制工程方面;
- 能力: 与信息理论有关;
- 信息处理: 与传感器网络有关;
- 实时通信: 与网络有关;
- 形式化方法: 与计算机科学有关;
- 中间件: 与软件工程有关。

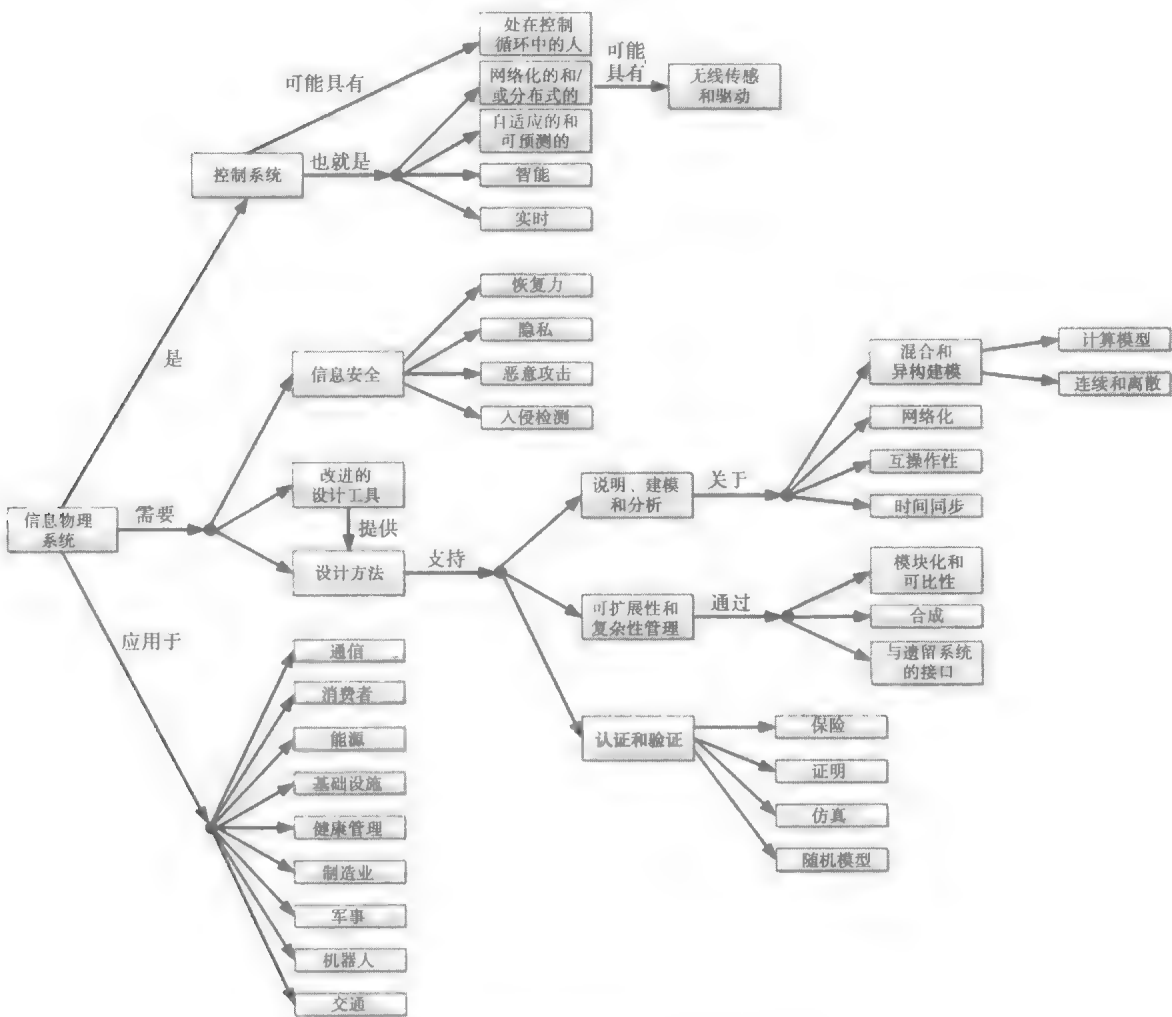


图 3.2 信息物理系统概念图 (http3 2015)

充分利用信息功能的物理系统，重新思考工业和制造业在二十一世纪的需求是十分重要的 (Krogh et al. 2008)。为了实现这些要求，需要设计和测试复杂系统的新方法，在这些系统中，物理特性是通过计算和其他方式来确定的。今天的现代计算机控制的制造业，主要通过将过程嵌入到计算机中以及工业机器人来完成的。制造业的复杂性主要集中在软硬件发展在信息物理系统和网络中的相互作用。同时，传统的学科界限也必须重新调整以适应新的信息物理系统。

3.2 信息物理系统设计建议

从现有的工业经验来看，知识的局限性在于如何将计算机和物理系统相结合。因此，基于这些有限的知识（方法和工具）继续设计出来的系统将是无效的，并且这些系统会有不安全和不可预测的风险。由于这些系统是异构的，并且包括多种类型的物理系统以及计算和通信的模型，因此，这些问题在信息物理系统的设计中极为重要。信息物理系统设计中的异质性将导致系统/产品特定的设计流程不适合设计自动化。这意味着设计复杂度的增加以及缺乏有效的、专业化的自动化设计工具会对生产率有所限制，并增加投放市场的时间。这意味着需要重新调整设计流程中的抽象层，并为信息物理系统的敏捷自动化设计构建一个新的基础结构。

因此，设计信息物理系统所面临的挑战主要集中在抽象的层面。抽象可以作为一个基于过程的部分，抽象掉低层架构的细节，使底层的系统组件的设计更加有效和透明。因此，任何抽

象层次的组件都应该是可预测和可靠的，这在技术上是可行的，因为查询可用系统组件的数量和功能以及在信息和物理部分之间进行代码可移植的软件开发是很重要的。如果它在技术上不可行，那么下一级的抽象必须以健壮性作为可靠的主成分分析的一部分来补偿。但抽象并不直接封装其对象的本质特征，这意味着它很难预测信息部分是否满足物理部分的要求（Pellizzoni 2015）。

让一个成功的系统设计遵循这些原则，假设构建可预测和可靠的组件在技术上是可行的。更难的是使无线连接变得可预测和可靠，因为交互式网络通信需求的增加可能会导致延迟，从而引发如何在不可靠的媒体（如无线）上支持延迟保证机制。在汽车行业，这是一个重要的问题，因为汽车有大约 75 个传感器和 100 个开关，它们由大约 1000 米的线路按顺序连接并形成线束。线束部分发生机械故障是一个非常昂贵的、非常沉重的且非常复杂的问题。因此，汽车工程试图解决如何在无线介质上保证延迟时间这一基本问题。一种可能的选择是使用健壮的编码和自适应协议对其修正提升一个等级。

当从简单的程序扩展到软件工程系统，特别是信息物理系统时，就会出现一个问题。事实上，即使是最简单的 C 程序在物理系统的上下文中也是不可预测和不可靠的，因为程序不会表达对信息物理系统任何方面的相关行为。它可以完美地执行，完全匹配其语义，但仍然无法提供物理系统所需的行为。例如，它可能会错过截止日期。由于时间不属于 C 的语义，程序是否错过截止日期实际上与它是否正确执行无关。但是，判断系统是否正确执行是非常重要的（Lee 2008）。因此，信息物理系统的设计采用具有固有复杂性的系统和软件工程，如图 3.3 所示。

从图 3.3 可以看出，在信息物理系统设计中，有嵌入式系统和软件工程领域两个基本的工程部门。系统工程方法可以描绘为：

89

- 在系统工程的项目中用跨学科的方法开发和实施复杂技术系统；
- 基本的必要性。因为在大型复杂的项目中，规划、协调和实施是难以管理的，可能导致在系统工程中执行项目时出现重大问题；
- 在信息物理系统中，软件密集型嵌入式计算系统和全球通信网络（GCN）的持续融合被认为是信息和通信技术进步的下一个重要阶段，它具有巨大的且不断变化的商业潜力以及集成产品和服务的新业务模式；
- 掌握复杂可靠的信息物理系统工程的关键是规划、实施和维持业务模式；
- 目前的系统工程框架并不能为工程系统和自然界之间的深层相互依存关系提供概念化和设计思路。因此，开发、实施和运行高效的信息物理系统，显然需要一个新的信息物理系统工程框架（CPSEF），这对管理应用领域中现在和未来的信息物理系统的复杂性十分重要。

工具



90

图 3.3 信息物理系统设计的系统和软件工程方法 (http4 2015)

软件工程的方法可以介绍为：

- 软件的系统的、可量化的设计、开发、操作和维护的工程方法；
- 涉及软件生产各个方面的工程方法；
- 使用合理的工程原理，以便经济地获得可靠的软件，并在真实的机器上有效地工作

IEEE 计算机学会和 ACM 是美国主要的软件工程专业组织，已经发布了软件工程研究的指南 IEEE 的《软件工程知识体指南》（2004 版）定义了该领域，并描述了 IEEE 期望的一个实践软件工程师应该具备的知识。

今天，信息物理系统提出了一系列的挑战，要求更好和更有效的体系结构设计环境，主要集中在以下几个方面：

- 信息物理系统的复杂性，来源于其不同工具和方法的并行、分布式开发；
- 可能是错综复杂的电子和软件结构；
- 各种不同的算法与其独特的挑战；
- 集成和测试的需求可能会变得昂贵且耗时；
- 在开发周期内管理需求变化的增加；
- 希望现在和未来的知识产权都得到重视。

关于这一具体的限制，SysML 和 UML (<http://www.omg.org> 2015) 已被设计为一个体系结构框架，并在众多行业中验证，它们分别针对功能、物理和软件体系结构以及它们的需求捕获和获取，并由 Rhapsody 扩展，它集成了一组丰富的外部组件，例如：

- 代码——C、C++、java 或 Ada；
- 工具——Simulink、StateMate、SDL 套件。

其主要优势是：

- 将设计环境中存在的各种组件集成到一致、持久的设计中；
- 在新的体系结构/平台中重用现有的 IP；
- 创建和维护设计的简化；
- 为需求追溯、变更管理和工程过程的其他方面提供标准支持；
- 合作型执行的能力，确保正确的接口和交互。

91

信息物理系统设计的一个非常重要的内在特征是界面。信息物理系统接口继承了信息和物理的所有部分，并增加了新的元素，以补偿计算和物理系统之间的差距。为了模拟信息和物理世界之间的交互，物理到信息（P2C）和信息到物理（C2P），这两个类型的定向连接器是必不可少的。因此，简单的传感器可以建模为物理到信息的连接器和信息到物理的连接器。

信息物理系统中的信息和物理元素之间更复杂的接口需要两个有向的转换器组件，包括信息单元一侧的端口和物理单元一侧的端口。这些转换器元件是物理到信息和信息到物理的转换器类型。如果接口是智能传感器，设备建模为 P2C/C2P 转换器，它们必须做的不仅仅是信息和物理节点之间的简单转换（Raihans et al. 2005）。为体系结构设计和分析提供相应的工具支持的一个主要困难是需要将这些能力调整到应用领域，举个例子来说，为一个具有两个区域（房间）的温度控制系统的体系结构建模，如图 3.4 所示。室内温度分别为  $T_1$  和  $T_2$ ，环境温度  $T_e$ 。假定两个区域的热容量分别为  $C_1$  和  $C_2$ ，并分别以热电阻  $R_1$  和  $R_2$  将热量输给环境。让 2 号区域通过一堵共用墙以热电阻率  $R$  对 1 号区域进行加热。恒温器物理上位于 1 号区域，所以它只能读取 1 号区域的温度。加热器可以手动打开或关闭。当暖气打开时，1 号区域的恒温器决定了暖气是否应该加热房间，并用一个鼓风机将热空气排入该房间。温度控制系统的目标是保持测量温度的 1 号区域接近预设的恒温点（Raihans et al. 2005）。

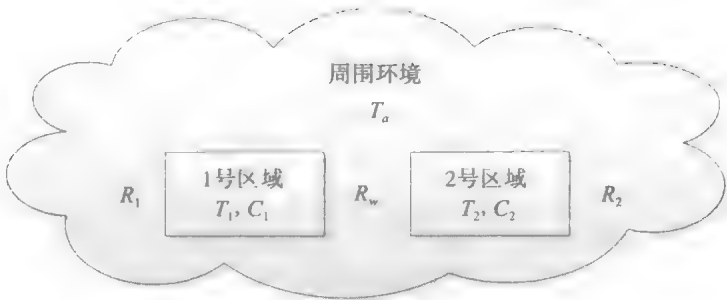


图 3.4 温度控制系统示意图

92

温度控制系统的结构可以使用 AcmeStudio 环境 (Schmerl and Garlan 2004) 来开发。AcmeStudio 是一个体系结构开发环境, 它作为 IBM 的 Eclipse IDE 框架 (http6 2003) 的插件, 并且支持 Acme ADL (Garlan et al. 2000)。Acme 是一种通用的 ADL, 支持组件和连接器体系结构。在 AcmeStudio 中, 可以开发不同的体系结构模型和风格。特定域的可用词汇显示在体系结构窗口的一侧的一个类型调色板上。对于温度控制, 例如, 它有一个在管道过滤器风格的体系结构模型; 组件面板允许架构师将管道、筛选器、数据存储及关联的接口拖到图表中来创建模型。该模型的样式与温度控制的其他类型不同。可以更详细地显示模型和样式中的选定元素, 显示它们的属性、规则、子结构和类型, 还允许用户输入属性值、定义规则等。

关于 AcmeStudio 的温度控制系统的体系结构建模功能, 其结果如图 3.5 所示。图 3.5 中的右手扇区域显示了信息、物理和信息物理接口。每个区域都建模为一个能量存储组件。因为环境温度对于房间温度动态性是独立的, 所以它建模为一个源组件。

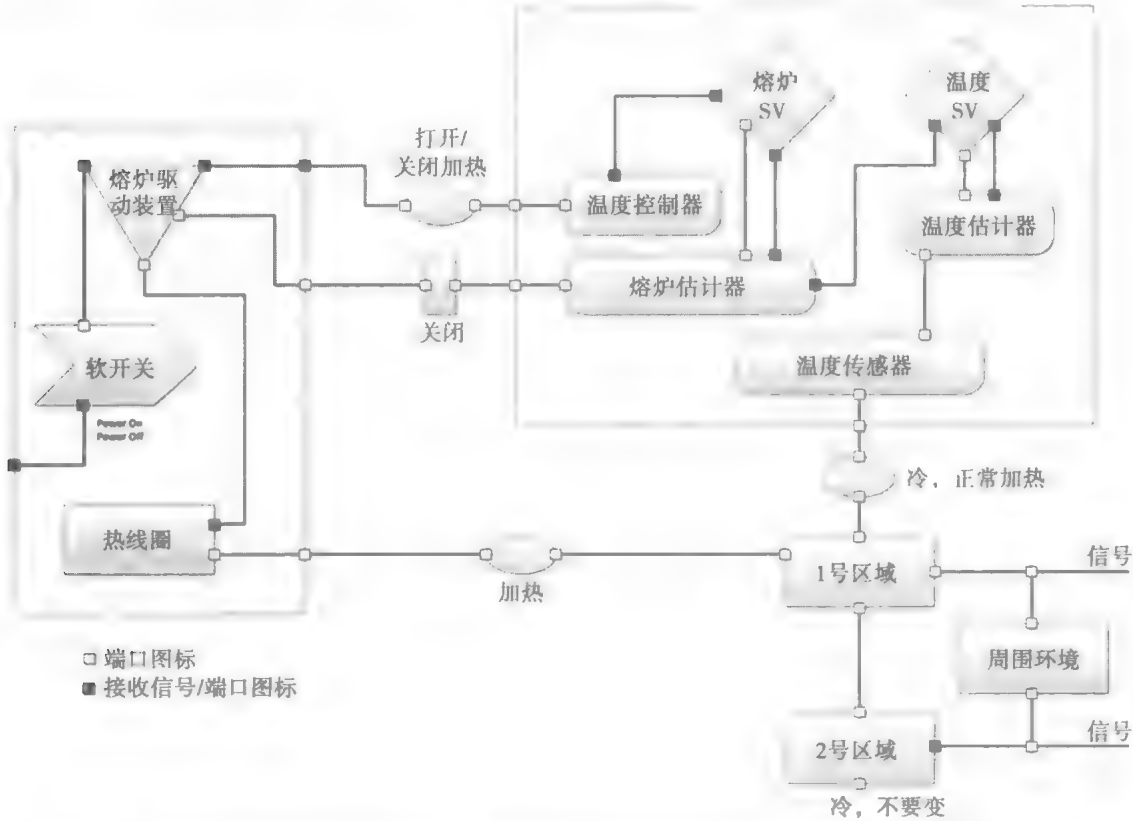


图 3.5 利用信息物理体系结构设计方法进行温度控制系统结构建模 (Raihans et al. 2005)

界面的右上角显示一个与恒温器相对应的边界框。该框包含一个温度传感器，能感知1号区域的温度，并在通信信道上进行广播。然后，温度估计器从通信通道中读取温度，并更新温度状态这一变量。熔炉估计器读取温度，并不断更新火炉的状态。温度控制器是软件的一部分，它保持监控的时候，熔炉估计器改变火炉的温度状态，以命令的形式传达给熔炉，通知它打开或关闭加热功能。

93

该熔炉包括一个熔炉执行元件，它接收温控器发出的指令，并将对应的发热元件（热线圈）打开或关闭。最后，一个软开关的传感器元件捕获手动的开/关信号，并将其与熔炉的软件元件进行通信，通知其打开或关闭发热元件。

1号区域和2号区域在建模中被视为能量储存元件和环境的来源。环境和两个区域之间的连接器是用于捕获单向耦合的定向输入、输出连接器，而两个区域之间的连接器是一个双向共享变量的连接器，用于捕获双向耦合。

3.3 信息物理系统需求

通过对需求的收集和分析可以得知，信息物理系统是一个对信息、物理和行为的范围以及互动敏感的系统，并强调严格的设计方法。这方面的技术包括从系统工程的角度进行功能分解、抽象和形式化分析，如图3.3所示。为了保持设计的复杂度，需要采用形式化和半形式化的方法对信息物理系统进行开发。在信息物理系统的设计的半形式化模式中，系统将在 SysML 和 UML 这两个分析工具中分配目标和可能的场景（见3.2节）。在形式化分析层次上分配的任务包括设计空间探索和系统分析层次的详细仿真分析。由于缺乏一个具有数学基础的集成科学，模拟分析是一项必不可少的任务。在信息物理系统中，异构数据源的语义被它们的本体所描述的术语和关系所捕获的情况下，本体成为构建可共享、可重用的知识库以及支持这些知识库相互作用的重要的方法（Zhai et al. 2007）。因此，可以定义本体为信息物理系统中属于真实世界的客观物体的抽象表示，这意味着本体构成了一个属于特定域模型，并定义了域的基本概念、它们的属性以及它们之间的关系，并以此作为知识库。因此，本体（O）在概念（C）、属性（P）和关系（R）等方面组织了一个知识域。换句话说，本体（O）是三元组的形式（Möller 2014）

94

$$O = (C, P, R)$$

其中C是对域至关重要的一组概念，P是该概念的属性，R是概念之间二进制的关系。一组基本关系定义为  $R = \{ \approx, \uparrow, \nabla \}$ ，随后为其具体的解释（Zhai et al. 2007）

- 对于任意两个存在本体的概念  $c_i, c_j \in C$ ， $\approx$ 表示等价的关系，即  $c_i \approx c_j$ 。如果两个概念  $c_i$  和  $c_j$  在物质上被认为是等价的，那么  $c_i$  的概念实例也可以用来表示  $c_j$  的实例，反之亦然。
- $\uparrow$ 是泛化符号，若两个本体表示为  $c_i \uparrow c_j$ ， $c_j$  会继承与  $c_i$  相关的所有属性；在指定  $c_i$  时，不需要为  $c_j$  重复  $c_i$  有的属性；
- $c_i \nabla c_j$  是指  $c_i$  有一部分的  $c_j$ 。如果本体中的一个概念是由其他概念聚合得到，则可以用  $\nabla$  表示。

3.3.1 需求工程

可以认为需求工程是定义、记录和维护需求的过程，它记录着物理和功能上的需求，并且需要产品及流程方面的专有设计。与需求工程有关的领域是系统和软件工程。该术语出现在20世纪90年代“IEEE Computer Society”的出版物（Thayer and Dorfmann 1997）以及一系列需



求工程相关会议的出版物中 (http11 2015) Alan M. Davis 维护着一个需求工程方面的大量的参考书目 (Davis 2011)。

根据开发系统的类型和特定的组织实践类型,需求工程所涉及的活动千差万别 这些可能包括 (http11 2015)

(1) 需求启发:从用户、客户和其他利益相关者处收集系统的需求,有时也称为需求收集;

(2) 需求的识别;

(3) 需求的分析和协商:确定满足新产品的需求或条件,协商不同利益关系者可能发生的对于需求的冲突;

(4) 需求说明:将需求记录在需求文档中;

(5) 系统建模:开发新系统的模型,通常使用符号语言,例如UML,UML文件在建模特定领域的分布式应用程序中广泛使用;

(6) 需求验证:检查文档中的需求与模型是否一致,是否满足利益关系者的需要;

(7) 需求管理:在系统开发和投入使用时对需求的更改进行管理

以上这些要求出于某些原因可能按时间的顺序提出,实际上,这些活动也会有许多过程的交叉,详见第6章。

### 3.3.2 互操作性

互操作性描述了系统协同工作的能力,这意味着它们可以相互交互 该术语最初是为信息和通信技术以及系统工程中的服务定义的,使其能够进行无缝的信息交换 一个更宽泛的定义是指社会、政治和组织因素对系统性能的影响 从更技术性的角度来讲,当单个系统组件由于技术上的不同而被不同的软件系统管理时,互操作性可以为系统构建一致的服务 互操作性可以解释为 (http12 2015)

- 语法互操作性:两个或多个系统能够以指定的数据格式和通信协议进行通信和交换数据的必要条件 扩展标记语言 (XML) 或标准查询语言 (SQL) 是语法互操作性的工具。
- 语义互操作性:能够对信息进行有意义和准确的自动解释,并产生有用的结果,这些定义是由系统的用户端所定义的,这对于制造业中的垂直集成是非常重要的 为了实现语义互操作性,两个或多个系统必须引用公共信息交换的参考模型

互操作性必须与开放标准区分开来 开放标准依赖于一个成员多样的咨询小组,包括供应商、学术界人士和其他持有可发展股份的代表 讨论已经提出的协议的技术和经济的优缺点以及可行性 在所有成员的疑虑和保留意见得到解决之后,最终的文件作为一个共同标准得到了认可。随后这份文件将会被公布,从此成为一个开放的标准 这个文件通常是公开发布的,象征性地收取少量费用,甚至免费提供,不会有更多的收费 不同的供应商和个人可以通过标准文档来制作满足其标准的产品,任何客户对于选择产品的特征是没有优势和责任的 (http12 2015)。

### 3.3.3 实时系统

一个实时系统需要完成任务的同时提供相应的服务,这意味着系统要将从输入到输出的响应时间压缩到一个足够小的可接受的范围内 实时系统包括数字控制、命令和控制、信号处理等方面。《Oxford Dictionary of Computing》给出了一个实时系统的定义:

任何系统产生输出的时间都是重要的。这通常是因为输入对应于物理世界中的某些运动，而输出必须与同一运动相关。从输入到输出所经历的时间必须足够小，才能被接受。

一个可预测且可靠的计算机系统项目 (Randell et al. 1995) 给出如下定义：

实时系统是需要对环境中的小的刺激 (包括伴随着物理时间的推移) 在一定的时间间隔内做出反应的系统。

幸运的是，如果系统响应不到位，通常不会带来灾难性后果。这些失败的响应可以看作系统的错误响应。正是这个方面把实时系统与其他系统区别开，在这里，响应时间是重要的，但不是决定性的。因此，实时系统的正确性不仅取决于计算的逻辑结果，还依赖于生成结果的时间。在实时计算机系统设计领域的从业者经常将实时系统分为硬实时系统和软实时系统 (Burns and Wellings 2001; Liu 2000)。

- 硬实时系统 (HRTSs)：需要在指定的最后期限内产生一个绝对响应的系统；
- 软实时系统 (SRTS)：在响应时间很重要的系统中，如果偶尔错过最后期限，系统仍能正常工作。软实时系统与交互系统是不同的，因为交互系统没有明确的最后期限 (Burns and Wellings 2001)。

使用术语“软”并不意味着单一类型的要求，而是包含许多不同的属性，例如

- 最后期限可以偶尔错过：通常有一个时间区间的上限；
- 服务有时可以延迟交付：通常有一个时间延迟的上限。

97

综上所述，实时嵌入式控制系统多用于制造过程和控制方面十分关键的应用；军事领域的通信、指挥和控制方面的复杂应用；以及在飞机、汽车、自主机器人、化工厂、医疗设备、配电系统等方面的应用。

实时系统的可靠性是通过将任务的需求转化为按时完成任务的概率问题来实现的。因此，面临的问题是，在处理器或软件故障时如何安排任务使系统在最后期限完成任务 (Chen et al. 2011a)。

### 3.3.4 GPU 计算

图形处理单元 (GPU) 已经发展成通用的能够进行高度并行计算的多核处理器。这种发展是由高清实时图像计算的需求所带动的。图形处理单元能够加速三维实时图像的生成，已经在 1990 年代中期成功商业化。这些图形卡上的处理器主要提供了三角纹理生成的硬件加速。在 2000 年年末，主要的显卡制造商将他们的处理器设计得更易于访问，并允许使用更多通用的编程语言的工具。NVIDIA 开发的 CUDA 计算机体系结构 (http13 2015) 允许软件工程师在 C 编程语言中开发 GPU 算法。类似的，AMD 的 Stream SDK 允许免费编程使用 OpenCL，OpenCL 是另一种扩展 C 语言的编程框架。

CUDA 为在 NVIDIA 生产的图形卡上对图形处理进行统一计算提供了一个标准模型。CUDA 将 C 和 C++ 编程语言扩展为适合其并行计算模型的语言。CUDA 的开发套件包括 cuBLAS，它是一个基本的线性代数子程序的实现。Garland 等人对 CUDA 编程模型以及其在数字线性代数和快速傅立叶变换等众多数学问题中的应用进行了较全面的综述 (Garland et al. 2008)。

图形处理单元是通过快速线程切换来隐藏内存访问的延迟。在 G80 GPU 上，全局内存访问不会被缓存，并且有数百个时钟周期的延迟。G80 GPU 能够并行运行 448 个硬件线程。线程是轻量级的，并且调度非常快。为了隐藏内存访问时间，等待内存访问完成的软件线程可以以非常低的开销挂起，从而将处理器电源留给活动线程。后继的 GPU (例如，GF100 GPU) 的目标是进行科学计算，通过添加一个 L1 和 L2 缓存来减少延迟。然而，使用 L1 缓存可以减少程

98

序可用的共享内存量，同时会在多处理器上并行执行给定程序的线程（Selke 2014）。

### 3.4 信息物理系统应用

信息物理系统涵盖了非常广泛的应用领域，它可以通过共享抽象知识和设计工具来更经济地设计系统。通过将最佳的实践应用到整个信息物理应用中，我们能设计更可靠的信息物理系统，从而利用技术和经济驱动因素创造出一种包含一系列新功能的环境。在过去十年中已产生了一些新一代的依靠信息物理技术的系统，例如：

- 先进的汽车系统；
- 生活辅助系统；
- 航空电子设备；
- 关键的基础设施控制（例如电力、水资源和通信系统）；
- 防御系统；
- 分布式机器人（网络会议、远程医疗）；
- 节能系统；
- 环境控制；
- 制造业；
- 医疗设备和系统；
- 过程控制；
- 智能结构；
- 交通控制与安全；
- 其他。

关于当前先进的汽车系统，美国国防高级研究计划署（DARPA）为美国自主汽车发起了一场盛大的挑战赛，挑战赛由美国国防部出资，用于弥合基础研究和军事用途之间的差距。最初的 DARPA 挑战赛是为了刺激技术的发展，以创建第一个能够在有限的时间内完成完全自主控制的地面车辆的越野课程。在 2007 年的第三次比赛中，比赛市区路线达到 96 公里，约 60 英里，所有车辆必须在不到 6 小时内完成比赛，并且遵守所有交通规则，同时与其他交通和障碍进行协商并且融入其中。整个信息物理系统的方法是在输入和输出数据之间进行行为转换，在几个特定的单元中处理，例如：

- 目标选择单元；
- 全球定位系统（GPS）单元；
- 路口处理单元；
- 车道驱动单元；
- 传感单元；
- 其他。

十一支代表大学、大型汽车和工程公司的队伍互相竞争，每支队伍得到具有稀疏标志点的地图，对应各自的竞赛路程，并且要遵守 DARPA 2017 的基本规则（http7 2015）：

- 车辆必须储存或保留安全记录文档；
- 车辆必须遵守加利福尼亚州的交通法规；
- 车辆必须是完全自主的，只能利用它通过传感器和公共信号检测到的信息，例如 GPS；
- DARPA 将在比赛开始前提供 24 小时的路由网络；
- 车辆将通过在指定的检查站之间行驶来完成这一路线；

- DARPA 将在比赛开始前 5 分钟提供一个详细说明检查站顺序的文件；
- 车辆可在 10 秒内“停止和启动”；
- 车辆必须能在雨和雾以及 GPS 被阻挡情况下运行；
- 车辆必须避免与其他车辆和物品的碰撞，如推车、自行车、交通桶和环境中的物体，例如电线杆；
- 车辆必须能够在停车区运行，并在需要的情况下进行 U 型转弯

六支队伍以及他们的自动汽车成功地完成了整个路线的挑战，其中，路线的第一个阶段必须到达平均速度 14 英里/小时 (22.53km/h)，第二个阶段平均速度为 13.7 英里/小时 (22.05 公里/小时)，第三个阶段平均速度为 13 英里/小时 (20.92 公里/小时)。这些竞赛代表了基于自主车辆的信息物理系统智能移动概念的基本原理。在最近的一次挑战中，2012 DARPA 机器人挑战赛主要专注于自主紧急维修机器人 (http8 2015; http9 2015)。

2010 年，谷歌宣布了他们基于丰田普锐斯车型的自动驾驶汽车发展结果。这些汽车在加利福尼亚和内华达州的公路和高速公路上的行驶总里程超过 100 万英里。他们配备了发射机激光测距仪、雷达和超声波运动探测器、摄像机和 GPS 接收机，可以感知其周围的极小细节。其中唯一的事故是在 2011 年位于硅谷的公司总部附近的五辆汽车的连环相撞，原因是当时有人手动驾驶了汽车 (LeValley 2013)。自主汽车已经有了很大的发展，但是离送我们去上班、购物或孩子上学还有很长的道路。在这方面，汽车黑客问题已经成为了热议的潜在危险问题，因为攻击者可以很容易地通过汽车的电子系统获取操控权 (Pellizzoni 2015)，例如：

100

- 启动/停止/加速/启停引擎；
- 制动/刹车失灵；
- 开门；
- 通过 GPS 确定位置；
- 监听司机在车里说的任何话。

英菲尼迪 Q50 是一个线控转向的嵌入式车辆，攻击者可以远程启动和驱动汽车。例如，从一个停车场到他的房子，或者操纵引擎管理系统或操纵驱动程序辅助系统。

此外，前文介绍的引进先进的汽车信息物理系统将在所有相关领域的科学和工程发挥重要作用，这些行为将导致突破，且带来了广泛的应用领域，如信息物理概念图所示 (http3 2015)。这需要开发先进的建模和集成框架，因为用于明确定义的案例研究的建模技术和综合集成工具链是信息物理系统应用中的一个基本问题，主要包括系统的行为、计算、物理和/或人类限制的信息物理系统的整体建模，以及信息物理系统设计工具之间的无缝互操作性。

按照图 3.2 所示的信息物理系统概念图，下面列出了一些重要的应用领域：

- 通信；
- 消费；
- 能源；
- 基础设施；
- 保健；
- 制造；
- 军事；
- 机器人；
- 交通。

后文将有更详细地讨论。

101

### 3.4.1 通信

通信是将消息从一个地方转移到另一个地方的行为,通信通常是指发送方通过安全通信信道向接收方或多个接收方发送数据,发送方将正在发送的数据编码为适合于通信信道的形式,然后接收方将接收到的数据解码,以了解其含义。通信存在各种技术解决方案,最常见的两种是无线技术和有线选项,例如铜缆和光纤电缆。无线和有线通信系统与其他具有相同能力的设备通信已成为许多行业发展最快的领域之一,因为无线网络在自动化领域面临的挑战是:

- 无线网络与传统的自动化网络有很大的不同;
- 无线网络从不 100% 可靠;
- 实时通信存在很多限制。

无线网络在自动化领域的机遇是:

- 系统和用户的移动性;
- 自组织通信;
- 现场设备的临时配置。

因此,无线技术可以比有线选项更好地改善数据传输,因为无线功能可以实现配电自动化的改进,例如智能电网,可以提高智能电网的整体性能。

使用无线通信在许多领域取得了重大进展,例如

- 机器对机器 (M2M) 通信:指允许无线和有线系统与其他设备进行通信的技术。M2M 被认为是物联网的一个组成部分 (见第4章),并为工业和商业带来了许多好处。一般来说,它提供了广泛的工业应用,例如自动化、物流、智能电网、智能城市等,主要用于检测和控制。
- 无线传感器网络 (WSN):指空间分布式自主传感器,监测物理或环境条件,并将其数据通过网络协同传递到汇聚点位置。在双向传感器网络形式中,它们还可以控制传感器。
- 无线体域网 (WBAN):指的是可穿戴式计算设备构成的无线网络,可以将其安装在身体某个固定位置上。WBAN 系统还可以使用基于无线个域网技术的网关,已获得更长距离的通信。通过网关设备,可以将人体上的可穿戴设备连接到互联网。

M2M 通信的初衷是源自两方面的考虑:

- 联网的机器比孤立的设备更有价值;
- 多台机器的有效互联和自主能力可以产生智能的应用程序。

因此,机器对机器 (M2M) 通信的发展为制造业和信息产业带来了新的机遇。除了这些应用领域,已经开始出现各种其他 M2M 通信的机会,例如辅助生活、医疗保健、智能家居、智能电网等。从这几个例子可以看出,信息物理系统将应用于 M2M 和 WSN 相关领域,因为在不久的将来会越来越需要更多的传感器输入和更加丰富的网络连接,而 WSN、M2M 和信息物理系统同属于物联网。

### 3.4.2 消费者交互

信息物理系统能够在消费者的交互方面发挥连接作用,因此,从以下几方面考量,消费者行为与自动化城市生活会进行整合:

- RFID 嵌入式解决方案;
- 娱乐;

- 银行；
- 日常使用的电子设备；
- 能源；
- 可穿戴的计算设备；
- 其他。

这些技术和场景都遵循融合的趋势，结合产品的众多要素，允许消费者在采购时有不同的决定。现在越来越需要保持产品信息的更新和可比性，使消费者做出明智的选择。样式、价格、规格和性能都可以通过 RFID 标签读取。因此，可能发布一种逐步转向电子商务 Web 店面的解决方案，其主要是企业对企业（B2B）和企业对客户（B2C）的解决方案，可以通过互联网与客户进行更多的合作，从而简化整个组织的现金流程订单。

在这方面，物联网（见第 4 章）和现在的互联网在零售购物环境以及家庭和工作方面正处于逐步改善的道路上，它们通过互联网向消费者寻求并提供与消费产品相关的客户服务，并降低成本，同时保持在线网站产品目录或在智能商务高级产品目录的动态更新。这类应用包括互联网信息服务，其存储预先分配给向系统注册的每个消费产品的通用产品代码（UPCN）的信息，以及互联网上指向一个或多个信息的位置的统一资源定位符（URL）的列表，例如与这种注册消费产品相关的万维网站点。电子商务网店的功能和优势如下：

103

- 企业软件支持；
- 企业对企业（B2B）和企业对消费者（B2C）的支持；
- Web 订单的实时端到端整合；
- 将新客户实时登记入数据库，受限的信用卡付款；
- 实时信用卡授权与后台功能集成；
- 向客户提供实时库存可用性；
- UPS、FedEx 等实时订单状态和货运跟踪；
- 基于数据库和高级定价目录信息的客户相关的实时产品定价；
- 满足客户需求的呼叫中心。

3.4.3 能源

在信息物理系统的背景下，未来能源系统的一个重要挑战是能源系统的信息和物理方面的融合，从而形成一种新的方法，通过网络通信和/或嵌入式实时系统组件整合信息和物理方面的能源过程计算。因此，能源系统的物理组件具有信息能力和信息资源，软件被嵌入到能源系统子系统或物理组件中，并且整个系统的资源（例如计算、通信网络带宽等）通常受到限制。这使得在信息物理能源系统（CPES）的背景下，实现未来的信息控制能源基础设施的战略方法成为可能，其中包括监测、控制和保护解决方案。在发生问题的情况下，这些系统将使用预定义的问题解决方案来自适应决策，这意味着它应该是自主运行的。因此，信息物理能源系统研究的主要重点是：

- 建模能源系统；
- 能源效率；
- 能源资源管理；
- 能源监测与控制；

以及信息物理能源系统在未来能源系统中的优势，这也就是所谓的智能电网。智能电网使用电脑来控制电网发电、电能负载和配电资产。这些计算机本身与大型通信网络（Lemmon and

104

Venkataramanan 2009) 进行了交互。在智能电网中, 分布式生产的能源和微电网起着关键作用, 以此实现电力网络的现代化。微电网的概念是假设一组负载和微型资源作为一个单一的控制系統, 为其局部区域提供电力和热能 (Lasseter 2002)。这个概念为定义分布式能源系统的运行提供了一个新的范例。因此, 在智能电网概念中, 通过可重构控制来提高电网稳定性和可靠性 (Lemmon and Venkataramanan 2009), 因此能源系统必须表现出自适应能力。为了实现这一性能, 必须嵌入能够监测、通信和控制不断发展的物理系统的信息技术 (Farhangi 2010)。能源系统自适应性能的初始策略包括安装监控传感器网络, 为了解决这些问题, 信息物理能源系统的建模方法显然适用于智能电网 (Macana et al 2011)。

为了理解并确定能源系统的动态响应过程, 建模是加强代表各自能源系统的几个实体的综合视图的最佳选择。为了能够构建这种能够将计算单元与物理世界的元素成功地结合在一起的复杂系统的模型, 最重要的是使用新的集成方法来设计, 例如使用 Modelica 和基于 Modelica 的工具, 这些工具对于这种集成模型有良好的开发环境。Modelica 是一个通用的建模概念 (Tiller 2001), 它属于面向对象的设计, 具有一些物理领域相关的功能库, 可以实现多层次应用的快速原型设计。文献 (Elsheikh et al. 2013) 介绍了一种基于 Modelica 的通过功能模型实现信息物理能源系统的快速原型设计方法, 其中成功使用了能源系统建模的用例。

从未来的能源系统来看, 以后将是各种技术和应用的结合。因此, 这种系统可以作为那些非统一的信息物理系统组件的组合, 例如配备各自本地信息的多种能源和不同类型的用户 (Ilıc et al. 2008), 但与目前通常使用的模型有一定差别, 并没有明确的感知和通信方面的考虑。然而, 由于各种组件的不统一性和复杂性, 并不是所有的物理组件都能成功建模。必须监控这些组件, 并且必须能够识别它们的相关模型。然而, 也需要考虑组件的不同性质, 其相互关联的拓扑结构和庞大的系统规模将导致前所未有的复杂程度, 这将在设计可互操作的电网组件、分析系统稳定性和提高效率方面产生严重问题。就像文献 (Palensky et al. 2014) 介绍的那样, 这将需要基于时间的连续事件和离散事件的模型来描述这些类型的信息物理能源系统。

Khaitan 等人 (Khaitan et al. 2015) 介绍了不同的以智能电网为核心的信息物理能源系统的建模方法, 其中还包含有关自动发电控制中的信息攻击。

信息物理能源系统的监测和控制策略可以包括网络控制 (Kottenestette et al. 2008)、多代理建模和基于多代理的控制 (Lin et al. 2010) 以及在线预测 (Zhang et al. 2009)。所有这些策略都认为网络通信和/或计算具有吞吐量限制, 从而限制了组件之间的信息通信。这些方法包括解决当前能源系统问题的两个主要方面 (Macana et al. 2011)。

- 通信和计算限制: 网络通信方面的限制 (例如时间延迟和吞吐量) 可能降低能源控制系统的性能, 甚至导致系统不稳定 (Lemmon and Venkataramanan 2009; Yang 2006)。信息物理系统设计方法需要考虑物理约束、网络以及计算限制。
- 计算效率: 目前能源系统的许多优化目标都是降低系统功耗, 从而作为气候变化和可持续发展等问题的替代方案。新的信息物理系统提供了一种解决计算效率目标的方法。如今的电网发电机按运行方式可以分为三类。
- 基本负载: 全天候运行, 提供最低的需求水平, 效率高。
- 中间负载: 经常运行以满足平均需求需求。
- 峰值负载: 节省运行以满足最大负载, 效率通常较差。

当使用可再生能源时, 上述的信息物理系统运行机制可能会不能正常工作。许多可再生能源不是很灵活, 因此不能以适当的方式进行控制。此外, 目前电网的现代化意味着将其与通信、控制和计算的新概念相联系, 从而产生了智能或智慧电网 (Farhangi 2010) 的概念。智能

电网使用计算机来控制电能产生、负载和资源分配，从而计算机可以通过大规模通信网络进行交互（Lemmon and Venkataramanan 2009）。在智能电网中，分布式发电和微电网在发展电网现代化方面发挥了关键作用。微电网的概念假设一组负载和微型资源可作为单个可控系统运行，为其局部区域提供电力和热能（Lasseter 2002）。这个概念为定义分布式电力生成提供了一个新的范例。

106

如今，很多的已提出的微电网架构显示了各种能源相关的资源的互联，例如微型涡轮机、风力涡轮机、燃料电池、太阳能电池等，这些设备同时与各种储能设备集成在一起，例如电池和电力电容器等。这种类型的架构强调：在大多数分布式发电机的连接中，变频器存在直流电流 - 交流电流（DC-AC）和交流电流 - 直流电流（AC-DC）的变电情况。然而，在智能电网中，如前所述，通过可重构控制（Lemmon and Venkataramanan 2009），电网稳定性和可靠性得到增强，而且能源系统必须表现出较好的适应性（Macana et al. 2011）。

3.4.4 基础设施

信息物理系统需要可靠的、实时的无线网络基础设施来进行信息传感、通信和智能控制。一个可靠性的系统可以通过网状网络、信道跳频机制和数据链路层确认机制得以保证。实时的系统行为需要至少一个集中的数据管理单元和时分多址（TDMA）数据链路层。在时分复用中，基站控制的小区单元格会链接一个或多个频道。但是，如果电源是基于电池的，则无线设备的较短的电池寿命性能会成为一个关键制约因素。为了延长电池寿命，可以提高电池容量或者是减少能源消耗，但后者现在还没有解决方法。由于无线设备的能量消耗可能依赖于与相关基站的距离，基站布局优化是解决电池寿命问题的最有效方法之一。如相关文献（Liu et al. 2012）所示，这种优化是一个混合型整数凸优化的问题，NP 难的模型对于优化的实际正确应用是很难的。为了解决这个问题，作者推荐了一种有效的算法，称为扩张 - 聚类 - 投影 - 收缩方法（ECPC）。

从这个例子可以看出，它主要集中在控制系统的基础设施方面，在信息物理系统中提供可靠和实时的基础设施服务，例如：

- 时分多址：保证及时交付；
- 信道跳频和黑名单：在活跃的物理信道通信，减少干扰，提供可靠的通信；
- 可信和安全通信：在联合过程和常规操作中使用公钥和私钥确保通信安全

信息安全标准是必不可少的，因为敏感信息大多存储在能够访问网络的计算机上，许多任务也是由计算机执行的。因此，在 20 世纪 90 年代，信息安全论坛（ISF）发表了一份全面的保证信息安全的清单，称为 Standard of Good Practice（SoGP）。ISF 持续更新 SoGP，最新版本于 2014 年 6 月出版（http14 2015）。

107

当前，信息物理系统的关键网络基础架构和数据管理能力可以用于以下方面：

- 农业、粮食生产和分配；
- 发电、输电和配电；
- 金融服务（银行、清算）；
- 天然气生产、运输和配送；
- 采暖（例如，天然气、燃料油、供热）；
- 石油和石油产品的生产、运输和配送；
- 公共卫生（医院、救护车）；
- 安全事务（警察、军事）；



- 电信；
- 运输系统（燃料供应、铁路网络、机场、港口、内陆航运）；
- 其他。

这些应用场景的解决方案可以利用一些基础设施，例如近场通信（NFC）和 IT 代码交换（QR 码）。

近场通信使用电磁感应机制，使读写器发出的小电流产生了一个磁场，并与想要通信的设备在物理世界里建立了通信机制。这是由在客户端设备上的一个线圈形成的，将它转换成电脉冲来进行数据通信，例如传输识别码状态信息或任何其他信息。被动近场通信标签使用的是读写器的能量来编码它们的响应，而主动或半主动的标签基于自己的电源使用自己的电磁场来响应读写器的请求。

QR 是快速响应代码的缩写，因为创建者打算让它的内容可以被高速解码。例如：在 2006 年，世界上最快的 SMS 打字员可以处理 160 个字符/分钟，互联网地址（URL）可以是 250 个字符。但要在移动浏览器中输入网络地址，此时最快的 SMS 打字员将花费大约一分多钟的时间。在这种背景下，QR 码的市场需求应运而生，因为代码取代了需要输入的信息。QR 码是被扫描输入的而不是打字输入，这就需要启用基于 Java 的智能设备或带有摄像头的智能设备。智能设备摄像机拍摄代码，智能设备中的一个特定的小程序分析代码，并对智能设备屏幕上的信息进行解码。技术术语 QR 码是一个特定的矩阵条码，需要可读的专用配有 QR 条码读取器和摄像头的智能设备。该代码由白色背景下的方形图案组成（主要是黑色）。编码的信息可以是文本、URL 或其他数据。大多数情况下，QR 码如下图所示：



这是作者及其大学机构的 QR 码。QR 码存储了地址和网址，它可能出现在杂志和标志、公交车、名片上，或者是任何用户可能需要信息的对象上。因此，用户可以使用配备了 QR 码读取器并且带有摄像头的智能设备扫描 QR 码的图像，来显示文本和联系信息，并连接到无线网络，或在智能设备浏览器中打开一个 Web 网页，这也就为 QR 码所代表的术语提供了名词解释：快速响应代码。

最近，出现了一些更先进的基础设施概念，例如把移动设备作为银行的一个渠道终端，这意味着要把私人设备和银行业务连接起来。为了达到这个目的，苹果公司正在全面地开发银行业务，并进入另一个新的领域——个人 ID，因为在客户的信用卡和银行业务能力的背后，所有的个人 ID 是十分重要的基础元素。ID 卡将跟随信用卡进入智能手机。因此，苹果宣布创建一个独特的、高潜力的、利润很高的金融基础设施。通过在每笔交易中收取 0.15% 的费用，苹果公司将创造一个价值数十亿美元的业务，在美国达 55 亿美元。

### 3.4.5 健康保障

当前,随着传感器、低功耗数字电路和无线通信方面的发展,已经可以使低成本、小规模 and 轻量化的传感器节点设计成为可能。这使信息物理系统成为健康保障应用的一种重要实现方式。它可以实现廉价的、小型化的、连续的医院内部和家居健康监控,并且通过物联网,它具有几乎实时的医疗数据更新 (Milenković et al. 2006)。对于信息物理系统来说,这些技术创新可以确保无论患者的位置在哪,系统可以提供远程患者身体条件监控,并且采取相应的行动。收集或者储存传感器数据,从传感器向其他系统传入相应的数据是通过与无线传输媒介相连的网关实现的。但是,由于从道德和法律的角度上来说,患者的相关数据是机密隐私的,所以安全问题成为了关注的重点问题。因此,在关于健康保障应用的信息物理系统结构的设计问题上,需要特别关注动态数据库数据完整性或者数据机密性以及在网络层的数据安全。这里还有一系列其他的重要问题需要考虑,举例来说,对于储存和管理海量从大量医疗传感器收集来的数据方面的要求。因此,数据库管理系统应该是高效和可靠的。还有,医疗数据可以提供有效的证据用以进行必要的治疗、拯救患者的至关重要的生命体征乃至生命,所有的数据应该是可读的,并且无论何时何地,这些数据对于授权的医疗人员是可以访问的。此外,对于基于大数据或者智能数据的智能决策系统来说,健康保障应用要求海量的计算资源。但是关于信息物理系统在健康保障方面的应用依然处于早期阶段 (Haque et al. 2014)。因此,大量的信息物理系统在健康保障方面的应用还是非常初级的 (Lee et al. 2012; Wu et al. 2011)。需要注意的是,Haque 等人 (2014) 对信息物理系统在健康保障方面的应用是这样描述的:

- 电子医疗记录 (EMR): 对自动读取关键标志的信息物理系统接口的设计 (Mendez and Ren 2012)。
- 医疗信息物理系统和大数据平台: 对于医疗信息物理系统的大数据处理框架结构 (Don and Dugki 2013)。
- 跌倒探测系统: 通过安放在头部位置的加速计和特定的关于识别跌倒的装置来侦测老年人突发的跌倒问题 (Wang et al. 2008)。
- 坐姿守卫: 在坐姿改变之后统计姿势复原时间长度,探测坐姿的位置以及相应的负载,如果有危险的移动或者是异常的负载作用在臀部时,发出报警,并且会通知相应的医师 (Iso-Ketola et al. 2008)。
- 移动健康: 从每天人们会携带的可穿戴的传感器上收数据 (Konstantas and Herzog 2003)。
- 警报网络: 由心率监测、氧气饱和度和心电图 (ECG) 监测组成的无线传感器网络原型系统 (Wood et al. 2008)。
- 移动心电图: 系统通过智能手机作为微基站来进行心电图测量和统计 (见图 3.6) (Kailanto et al. 2008)。
- iCabinet: 利用 RFID 监控药品使用状况,记录已经使用的药品情况 (Lopez-Nores et al. 2008)。
- 安全的、基于云计算的和可扩展的电子健康体系架构: 针对手机访问由医疗传感器产生的海量数据而设计 (Lounis et al. 2012)。
- 基于无线传感器网络云的自动化远程医疗: 依靠无线传感器网络、云整合机制以及云间的动态写作来提供电子健康保障服务 (Perumal et al. 2012)。
- CPS-MAS: 关于安全认证的信息物理医疗系统建模和分析框架 (Banerjee et al. 2011)。
- 其他



图 3.6 无线心脏起搏器直接植入心房并且可以通过附近的智能手机进行外部监控

然而，计算技术是信息物理系统的核心技术，用来改善系统的可扩展性，保证在多样的医疗应用里的实时数据分析，以及整合和管理多样性的医疗设备和最优化的治疗方案。在研究健康保障方面，信息物理系统研究的快速发展主要集中在周边的健康保障环境，可以利用普适监控技术来协助和保障生活以及家庭安全等。

正如相关文献（NITRD 2009）所述，在假体设备上的直接影响会依赖复杂的信息技术以及控制技术。在人造假肢、人造手、人造脚和潜在的智能假肢设备等领域，探索才刚刚开始。存在这样一种可能的情况，患者可以通过脑部活动来控制相应的假肢。如果这些技术开始在很多患者那里应用，需要特别关注很多关于人造设备在生物环境下交互的安全和挑战，包括人身安全、效率和控制等方面。但是，复杂的人造假体必须与它们的用户进行准确的交互。如果一个假体设备拥有多个功能，这种系统必须在设计上使用户一直清楚其所处的状态，并且可以合适地控制当前模式下的操作行动。否则，如果使用者处于高度动态模式下，模式的混乱会使用户进行错误的动作，而且会导致潜在的伤害，在这种模式下，危险的情况会发展得很快。自适应的监控策略应该被嵌入到系统中，来保证系统的可控性和可监督性（见 1.3 小节）。对于很多情况来说，可见的系统反馈是不可能的。触觉感受会提供更多的信息，而且增加系统的复杂度，因此，一些至关重要的研究领域包含（NITRD 2009）：

- 在错误的时间模式混乱导致用户做出正确的事情；
- 触觉反馈；
- 驱使；
- 智能假体；
- 数据融合与同步；
- 人参与的闭环控制；
- 自适应控制。

另一个重要的健康保障领域是最小介入性诊断和介入技术，例如，利用微型介入性方法来获得生物型数据以及进行手术型介入。一个重要的领域是发现感染和并发伤病的危险，同时预测病人康复的时间，如果可以避免大手术创伤的话，这可以节省大量的康复时间。精确的微型手术也从相关的技术中受益匪浅，由于现在的电子医疗设备系统小型化达到了微米级甚至纳米级，称为 MEMS 和 NEMS（见第 4 章和第 5 章）。小型传感器探测系统的范围从毫米级到微米级到纳米级，举个例子来说，物理或者化学量或者集成在服装上的传感器、执行器、计算部件、能源设备等组成了交互式通信网络的各个部分。

让我们来假设一下，这种装置可以通过血管进入心脏，控制心跳的频率。另外，这种装置可以进行微型手术，形成一个小窗口来减弱导电性并改变信号来缓和心跳频率，这是一种心律不齐的常见症状。对于这种设备的挑战就是要减少对于周围组织的伤害，并且在变化的自然运动中复杂的人类生物环境实践中提供精确的控制（NITRD 2009）

112

因此，生物和医疗上的进步为介入式治疗打开了大门。

- 系统：心血管，肾脏，呼吸系统，生物力学等。
- 器官：心脏，肾脏，肝脏，眼睛，耳朵等。
- 细胞：激素，蛋白质，维生素，氨基酸等。
- 分子：B-1 细胞，IGM 抗体等。

心脏器官是由三种主要的心肌肌肉组成的：心房肌肉、心室肌肉和特定的兴奋和传导性肌肉纤维。心房肌肉和心室肌肉通过骨架肌肉纤维按照相同的频率收缩。特定的兴奋和传导性肌肉纤维现在只能微弱地收缩，因为它含有极少量的收缩性原纤维。所以它们对于心脏和传输系统提供了一个兴奋系统，来通过心脏脉冲进行迅速的感应。从一次心脏收缩的结束到下一次收缩的结束称为一个心动周期。心动周期由放松周期（称为心脏舒张期）和在它之前的心脏收缩期组成。每一个心动周期由心窦（S-A）节点自发地、无意识地形成，它是一个特别的、小型的、新月状的、条状的肌肉细胞，位于右侧心房的顶端。这种 S-A 节点可以称为心跳速率的产生者。任何心脏潜在的活动，都可以由心窦节点开始，导致心跳的电脉冲。因此，如果有电脉冲穿过心脏房室，就会导致心脏收缩。为了正确地进行心跳，电信号穿越了一条特殊的路线到达心室（心脏房室的下半部分）。在有疾病发生的情况下，心跳频率可能会过快（大于每分钟 80 次），称为心动过速，或者可能会过慢（小于每分钟 60 次），称为心动过缓，正常情况下心跳频率约为每分钟 60 到 80 次，或者是不规则的。不规则的心跳可以是过快的或者是过慢的，甚至是无节奏的。有时候无规则的心跳也是有规律的，比如说把每三下的心跳组合起来看，有可能就会是有规律的。有的人是完全无规律的，这称为无规则无规律心跳。如果出现过慢心跳节奏或者过快心跳节奏，那么它的心跳节奏控制器（心窦，S-A）便是已知的。心跳节奏控制器是一个依靠电池运作的小型设备，它来帮助心跳节奏在一个有规律的节奏下运行，如果心律过慢，心率过快等情况出现，心跳节奏控制器可以帮助改善心跳节奏，或者它还可以是一个处于心脏电子系统的封闭区域。出于这样的目的，心跳节律控制器系统应用了精确地时间电子信号来促使心脏肌肉收缩，产生一个与正常情况下非常相似且自然的心跳节奏。

与传统的心脏起搏器不同，新的心脏起搏器装置是完全的自我包装，且不需要线缆来与心脏肌肉相连。它也需要经过胸部切口的导管植入体内。Medtronic 公司启动了一个无线心脏起搏器项目，并于 2010 年在 TEDMED 上展示。这个设备可以通过导管被直接植入心脏房室，并且通过微型爪永久性地附着在肌肉上。然后，医生就可以通过就近的智能手机，用无线传感器来控制设备的相应功能，如图 3.6 所示。

113

3.4.6 制造

制造的目的是产生可以销售给消费者的产品。因此，必须合理地规划设备来完成这个目标。在把资源变成有附加价值的产品的过程中，资本、能源、人力、信息和原始资源是必要的、可运输的和可消费的。制造系统本身可以划分成五个相互关联的功能（Askin and Standridge 1993）：

- 产品设计；
- 过程计划；

- 生产执行;
- 资源流动和设备部署;
- 生产计划和控制。

这些包括了机器如何部署和保养,如何组织和调度,系统的表现是如何衡量的,以及更多内容。根据热力学第一定律所述,在一个系统中能量是守恒的,而如热力学第二定律所述,在一个系统中熵是随着时间的流逝而不断增加的,也就是说系统有趋于无序的趋势。这些都可以用来描述制造业系统的特点(见第7章)。在制造业系统中运用热力学第一定律,我们可以声明在进行中的工作量(WIP)等于生产速率(PR)乘以生产时间(TI):

$$WIP = PR \cdot TI$$

通过分配更多的资源来增加在进行中的任务等级会增加生产速率。如果增加生产速率达到了可以使用的机器的极限,这就意味着生产机器是被完全使用的,在进行中的工作量也会相应增加,这也会导致更长的生产时间。在生产中运行热力学第二定律注重守恒,因为制造系统是把原料从初始状态加工到完全成品状态。这就意味着一个长期稳定的制造业系统没有存货积累,输入量必须等于输出量(Askin and Standridge 1993)。

同时,在过去的几年中,生产线上大量的生产过程已经使用了先进的信息物理系统技术,机器可以与正在进行的任务、机器单元、组件以及其他事物进行信息交流,来实现很多高效的工作流程。出于这个目的,信息物理系统使用了实时的和环境敏感的传感器和执行器组合,并且把机器认知和人类认知能力相结合。

在这一方面,物联网的应用可以说是智能制造的一个重要组成部分,因为制造业会从无线连接的传感器收集的数据上以及这些数据经过处理后在工厂里的机器、工人之间、车间操作者和其他的支持操作层面的交流之间受益。

114

这就会导致在建造智能制造系统的时候会需要物联网技术的帮助,在信息物理系统的概念里,新的数字制造的范例也称作工业4.0(见第7章)。在这种概念下的信息物理制造业系统整合了智能网络系统,包括了全部通信和控制链,而且显著降低了车间操作者的介入,以下关于数字制造/工业4.0的特点是十分关键的,并且当实现智能制造系统时应该被着重考虑:

- 从价值网络上的平行整合意味着制定由信息物理系统支持的商业策略和新的可持续发展的价值网络的课题。
- 信息物理系统的终端到终端的数字整合和贯穿于全部价值链的软件工程,要求合适的信息技术系统来为价值链上从产品开发到制造业系统工程、生产及服务、每一个终端到终端提供支持。
- 纵向合并的整体和网络支持的制造业系统要求信息物理系统作为一个整体来产生灵活的和可重构的制造业系统。这意味着对于每一种特殊的情境来说,布局规则必须定义成按照实际情况为准的自动化工厂设备构造结构,包括相关联的规则下的模型、数据、通信以及算法。

从一个介绍纵向整合整体和网络化制造业系统的案例可以看出,如何满足消费者个性化型制造和个人消费者的需求。当今的汽车工业有着预先设定好的工艺序列和固定的生产线,很难重新构造并生产出新的多样化产品。软件支持的制造业执行系统(MES)是以生产线硬件为基础,具有密集性功能,因此它们基本上是一成不变的。让我们假设以后的车辆会变成智能设备,而且会从一个装备着信息物理系统制造模块自动地从装配车间转移到另一个模块。这种动态重构的生产线让组合与匹配与汽车相关的设备成为可能。此外,例如后勤方面瓶颈的应对、独特的多样化(如匹配汽车的座椅)就可以在任何时间实现(Industrie 4.0 2015)。

在纺织品制造时代，在高薪水国家纺织品制造为流水线生产。为了适应纺织品生产链，数字化生产（工业4.0）的信息会流经企业的全部层级，并且需要与其他的纺织业流程单位相关联。这使得灵活而快速的生产出大量的订单成为现实。因此，在信息物理系统的世界里，可以实现机器与机器之间的通信和机器与车间操作者之间的通信。它们互相通知其状态以及即将到来的问题，例如保养。

115

在这种情况下，为了实现消费者产品的订单，工厂会重新组织自己的布局。纺织机器会打开它相应的接口来灵活的、独立的适应全局信息平台。CAN总线、处理器、光纤会成为信息的载体以此来将纺织过程链自动化（Gloy and Schwarz 2015）。

人机交互是信息物理系统生产过程中的一个主要方面。例如智能手机、平板电脑或者头戴显示设备等个人智能设备的使用都为创新提供了巨大的可能。智能化个人设备可以通过复杂的渠道显示相关的生产参数来提供更多的透明性。另外，指导性程序可以优化生产或者在机器崩溃时更快地做出反应。远程维护也是一个重要的方面，例如由机器产品支持机器维修会更加简单（Gloy and Schwarz 2015）。

纺织器经纱张力的自我优化是一个在数字制造领域具有创新性的数字化技术。它的目的是使织布机自动将经纱张力的数值设置在一个较小的等级，并且不会减少过程的稳定性。因此，作为自我优化的一部分，这种过程模型必须有能力使织布机在编制的过程中自动地将经纱张力设置在一个数值较小的等级，并且不会减小过程的稳定性。目前为止，这种织布机可以在特定的执行域中产生自己的过程模型，而不是机器通过实验的方法运转，并自动计算出在预定的测试点的经纱张力。操作点在质量标准的帮助下得出，这种经纱张力会变得很小（Gloy 2013）。

此外，远程传感器也被植入到纺线过程中。在工业纺织纤维领域针对自动纺线瑕疵探测系统正处于讨论中。这个系统可以在低分辨率的图像数据上工作（约等于200ppi），也可以通过新的信息物理系统对于过程流的描述来在高分辨率的纺织图像上区分单根纱线（约等于1000ppi）。这个工作可以分成两个部分：第一部分，对机械技工、机器整合、震动消除和照明条件基于整体嵌入真正的纺织机里的讨论；第二部分，软件架构对于高精度度纤维的探测技术已经出现。这个系统在一个有54个工业化纤维图片的数据库的基础上改进，以低错误报警率完成了100%的探测率，并且具有很高的质量（Schneider et al. 2012）。

在先进制造业系统的一些相关领域的研究课题有：

- 先进的云制造业和支持产业链；
- 在工业过程中的先进的模型和协调控制；
- 在CPS中网络化制造过程；
- 在CPS中的网络化制造系统；
- 智能传感技术和仪器；
- 物联网在智能制造业中的应用；
- 实时生产计划和可适应的控制技术；
- 智能工厂和智能支持产业链。

更多的详细信息，请见第7章。

116

3.4.7 军事

嵌入式计算系统（见第2章）组成了一个普遍的、网络化的计算系统等级。这样的系统包括的领域非常广泛，从非常大的管理物理基础设施的监督控制和数据需求获取系统（SCADA）到军事设备（例如无人汽车），到交流的设备（例如智能手机），到特殊的机械（例如卫星）。

由于各种各样的原因,这些设备已经被网络化了,包括可以方便地访问系统健康信息的能力、执行软件更新、提供创新性的特点、实现消耗低和易用性方面的发展(http16 2015)。黑客已经展示了这些网络化的嵌入式计算系统是易于受到远程攻击的,这些攻击可以导致物理上的损坏,并且造成的影响是监控器所察觉不到的。

因此,这些研究关注于可以建立高保障型的信息物理军事系统(HACMS)的技术。这里的高保障性意味着正确的功能性和满足相应的安全属性。完成这一目标要求与软件社区完全不同的策略。最后,这种新型的高保障型信息物理系统采用了清晰的计划、正规的方法作为策略和执行的基础,来实现半自动化的密码合成。此外,为了生成密码,HACMS找到了一个可以产生出机器验证的合成者来生成满足功能说明和安全策略的密码。关键的技术性挑战是确保这种技术是可组合的,允许高保障系统在其之外安装部件(http16 2015)。

关键的HACMS技术包括交互式软件合成系统、定理证明和模型检查的验证工具以及特定的语言。最近在可满足性理论(SAT)和可满足性模理论(SMT)的解决方案、离散逻辑、理论验证器、模型检查器、特定领域的语言和密码合成引擎等基本原理的进步,表示了这种方法是可行的。如果成功,HACMS会生产一系列集成了高保障型的软件的民用工具,并且可以在商用和防御型软件中大量应用。HACMS尝试使用这些工具来生成开源的、高保障型的操作系统,以及控制系统的组件,并且使用这些组件来构建新的高保障型的军事器械。HACMS很可能将它的技术转型到保障和商业群体中,对于防卫部门来说,HACMS会提供高保障的军事系统,从无人设备(例如UAV、UGV和UUV)到武器系统、卫星、指挥和控制设备

[117]

除了以上提到的一些课题,在军事领域的研究挑战有:

- 合成攻击复原控制系统;
- 合成操作系统代码;
- 特定的语言——功能、环境、硬件、资源;
- 各部分的组合;
- 验证工程;
- 标度;
- 攻击/崩溃响应;
- 验证和合法化的完成系统;
- 时间管理——同步的、异步的、并发的(Schneider et al. 2012);

对于飞行控制系统,这会导致:

- 同步战斗控制系统,并验证嵌入式系统的语言域(EDSL);
- 验证控制流的整体性;
- 验证简单的机构扩展到监督者安全属性(Fischer 2013)。

### 3.4.8 机器人

在当今的工业中,不同形式的机器人是一股非常强大的力量。它们能够精确地执行许多不同的任务和操作,并且不需要和人类一样安全的、舒适的环境。然而,机器人的正常工作需要花费大量的精力和资源。机器人的运动控制在计算机运行的一个包含机器人功能程序的监督之下。因此,如果程序改变,机器人的动作将会相应地改变。使用机器人的目的是将它当作一个设备来使用,它可以执行许多不同的任务。因此机器人是非常灵活的,它无论做什么,都无需重新设计新的设备。因此,机器人被设计为能够执行任何任务,并且可以通过简单的编程改变程序本身。根据日本工业机器人协会(JIRA)、美国机器人研究所(RIA)等机构的工作,

机器人可以按不同的方式分类。机器人的优点和缺点如下所示 (Niku 2001)。

● 在许多自动化的情况下, 机器人可以提高产品的生产率、安全性、效率、质量以及一致性;

- 机器人能够在危险的环境中工作, 而无需对生命的保障、舒适或安全等方面的关注;
- 机器人不需要环境舒适;
- 机器人可以全年无休地工作, 不会历疲劳或无聊, 它们不需要医疗保险或假期;
- 除非机器人在工作期间发生了磨损或损坏, 否则它们可以一直高精度地工作;
- 机器人的工作比人类的更精确, 新的晶片处理机器人的精度很高;
- 机器人虽然具有某些感官上的优势, 但在以下方面的能力有限:
  - 执行;
  - 控制器;
  - 自由度;
  - 良好的运动参照能力;
  - 实时响应;
  - 传感器;
  - 视觉系统。
- 机器人在以下方面代价高昂:
  - 设备的初始成本;
  - 安装费用;
  - 外围设备的需要;
  - 培训需要;
  - 编程需要。

118

然而, 机器人系统是信息物理系统的一个重要类别。机器人与环境进行智能交互的能力取决于:

- 嵌入式计算与通信;
- 实时控制;
- 对周围环境世界的感知。

更先进的机器人系统将会实现信息物理系统的期望, 包括越来越智能的机器人系统, 例如机器人手术系统、机器人对智能家居生活的辅助、机器人团队的勘探和对紧急救援的响应以及属于智能环境机器人系统中的车辆自动驾驶。所有这些类型的机器人都是远程机器人, 它们通过网络获得智能和功能。传感器、执行器、微处理器和/或微控制器、数据库、云计算和控制软件将协同工作。

考虑到优缺点、能力和限制, 信息物理机器人系统的设计方法应该支持:

- 发展活动, 例如:
  - 建模;
  - 模拟;
  - 验证/测试;
- 方法
  - 模拟, 包含模型测试、循环建模和快速建模;
  - 模型, 包含硬件的循环和软件的循环;
  - (预) 生产, 包含机器人系统测试;

119



- 支持的工具；
- 支持的库；
- 集成工具链；
- 硬软实时约束。

一个拾取和放置功能的智能制造机器人提供移动组件的服务不会仅仅有一、两个地方，它的目标是将栈中的组件从一个位置移动到下一个，并根据不同的组件对最终的栈进行排序。排序是一种新的行为，它基于对每个不同的组件的局部控制。由虚拟世界的视频流所组成的立体视觉使机器人能够率先找到组件的堆叠位置。前馈控制允许快速拾取和就地操作，而反馈控制用于移动组件的位置。

### 3.4.9 交通

交通系统是一个巨大的、开放的、相互依存的网络，承载着数百万吨的货运和数百万的乘客。每天交通系统网络连接城市、制造商和零售商，通过复杂的公路、铁路和火车站、海港、港口以及机场和枢纽网络，运送大量的货物和乘客（Moller 2014；Sammon and Caverly 2007）。因此，运输系统部门是全球化世界中任何现代经济基础设施的最重要组成部分。它也是日常生活的一个核心组成部分，例如在某一特定地区的旅行需求和大城市地区的货运。所以需要一个综合框架来整合目标系统的各个方面。运输系统部门也与其他重要的基础设施部门（例如能源部门）有重要的依存关系。运输和能源直接向广大客户运送大量燃料，从而为各种类型的运输提供燃料。此外，各种运输领域和方式的跨部门的依存关系以及供应链之间的影响是必须考虑的（Sammon and Caverly 2007）。

120

交通系统部门包括物理对象和组织对象的相互作用，使交通更加智能。这些对象包括信息和通信技术（ICT）、所需的基础设施、车辆和驾驶员、多种运输方式的接口等（Torin 2007）。在先进的运输系统中通过多种运输方式相互作用、相互影响，并提供创新服务，这不能从现有的运输系统交通和流动管理的单一模式获取。

运输系统模型使运输管理人员能够更有策略地使用运输网络，安全和更有效地管理日常业务。但如今开放的运输系统部门依存于城市和大都市的网络，需要对所有的操作条件进行优化。如果运输方式、经济、土地利用和对自然资源的影响都包括在交通系统规划战略中，就可以成功地实现这一目标。

多模式的交通系统的未来不能仅仅靠单一的计划来衡量。交通系统和移动性管理的数学模型结合了真实和假设的场景，并进行运输系统分析，其中包括评估和/或设计的交通流量，确定最可靠的物理操作模式（例如，新的道路）和组织（例如，新的目的地）对象，以及物体与它们对环境的影响之间的相互作用。这些数学模型是对小型、中型和大型多模式交通系统（Cascetta 2009）的分析、规划和评估的基础。基于模型的情景分析的成功是由对交通系统响应的预测及评估得到的。一个理想的运输系统的设计和操作方法可以使用基于模型的分析结合后向估计或回溯来实现。因此，建模和仿真可以在规划、开发和评估多模式交通系统、提高运输效率和不断满足该系统的需求这些方面发挥作用。各种模拟模型捕获到的运输系统的特点都是不同的，这样就能够对复杂的模拟场景进行评估，其中每一项都代表着运输系统或某种操作策略的某一个方面。多模式交通系统模型可以按如下分类（moller 2014）。

- 供应模型：代表多模式交通系统部门的服务，用于在特定区域内不同经营点之间的交通；
- 需求模型：能够预测旅游相关方面的需求，并将其转化为系统活动的功能和运输系统

提供的服务水平；

- 分配模型：使用多模式交通系统作为分配的对象。

正如之前所提到的，个人流动性是每个国家经济成功和繁荣的关键。但是，世界上的特大城市的人口增长和交通量的增加却导致了交通的瘫痪。在世界上前 30 的特大城市，瘫痪的交通产生的损失每年超过 2660 亿美元。如何解决日益增长的客运交通问题的答案就在于将运输数据和模式智能地连接起来，使人们能够快速、方便地使用不同的运输模式，去他们所要去的121地方（Möller 2014）。在综合运输平台上将各种选择和提供的服务捆绑在一起，会对提供全面的管理功能有重要作用。这是最近一项由罗兰贝格战略顾问（Roland Berger Strategy Consultants）所提出的题为“连接的移动性 2025”的研究报告中的主要结论（Berger 2013）。

因此，手动和自动化分析运输的各种性质需要一定的工具。考虑到运输中的车辆模型，可能需要验证：

- 当汽车在固定坡度的道路上行驶时，自动变速器控制不会产生震荡；
- 巡航控制的预计速度有一定的容错性；
- 在这种情况下，运输只会在合理范围内消耗能源。

这就需要使用一些方法和技术在信息应用上来提升交通系统的性能，并保证交通系统中信息物理系统的实时性。因此，信息和运输过程在控制指令信息的范围内的整合将导致：

- 信息流；
- 控制指令；
- 基于信息物理系统的交通控制系统在交通系统中对行为的控制；
- 计算机系统间的信息流；
- 交通灯和交通标志系统（Fidêncio and Cota, 2014; Jehle 2014）；
- 交通控制系统中的旅客；
- 其他。

因此，信息和运输过程的集成可以作为交通控制过程的一部分来实现。因此，未来智能交通系统的重点是保障自动化驾驶的汽车的防碰撞、交通交叉口的防碰撞算法以及城市内自主交通的实时规划，这是实现智慧城市的一个重要问题（见 3.5 节）。关于这些话题，必须指出的是信息物理系统应用在运输中的方法不仅是先进信息和通信理论的实践，同时它也是由理论所建立的新系统，即信息与通信过程、物理过程以及智能交通系统网络的结合。因此，未来的信息物理运输控制系统的发展必须由自身的重新分析开始（Jianjun et al. 2013）。在这122方面，信息物理运输系统不仅可以被运输系统的操作所控制，而且也能被处在系统中的人们直接控制。

因此，对于信息物理运输系统而言，所有的信息都包括在获取运输控制目标的过程中。无论它占据了什么，包括系统、材料或者能量，系统都依赖于它们以及它们的呈现方式、获取、存储、传播和处理。因此，可以预期到智能运输系统（Weiland and Purser 2000）处理运输行业将面临的数量庞大的挑战。在智能交通系统中预期的解决方案会实时、可靠地向驾驶员提供交通信息，例如关键性安全应用（如车道更换时的盲点警告）以及改善驾驶体验和改善驾驶环境的应用程序（如通知拥堵和重新布线的建议，可以帮助缓解交通拥堵和生产力下降）（Gokhale et al. 2010, Zhao and Cao 2008）。支持这些应用要求对智能运输系统和它的通信网络类型要有深入的理解：

- 交通无线网络中的车对车通信；
- 包括了车辆与路边基础设施通信的无线网络；
- 占据主导地位的连接了多个基础设施之间的有线通信。

根据 Gokhale 等人 (2010) 提出的多个挑战, 车与车之间和路边设施的通信的信息传播的实时性和可实现性是一个困难的问题。因此, 系统的物理特性 (例如无线电收发机功率、无线信道的共享特性、车辆的移动性以及车辆的密度) 都会引起一些挑战。其他的挑战则是因为网络基础设施的异常行为造成的, 包括 IEEE 802.11 协议的表现、媒体访问控制 (MAC)、地址解析协议 (ARP)、因特网协议 (IP) 寻址和路由以及传输控制协议 (TCP) 重传和拥塞控制。

### 3.5 智慧城市和万联网

如果考虑到智能手机、平板电脑、小工具和其他智能设备的重要性, 数字技术和数字操作选项就变得越来越重要。今天的每个智能手机都具有比 20 世纪 60 年代发射到月球的第一个阿波罗火箭更多的计算性能。在今天的新技术时代, 在通信速度和数量方面更容易获得更好的信息质量。其原因是物联网 (见第 4 章), 因为它是一次有着难以想象规模的人与物的联系事件。预计到 2017 年, 互联网将连接 35 亿人, 其中 64% 通过移动设备连接, 人与所有物体的联网将产生大量数据, 约达 40 万亿 GB (http17 2015)。由 1.5-1 可知, 连接设备的数量将超过今天的世界总人口。因此, 以下原因将所有物体联网的步伐加快:

- 云计算和分析的发展;
- 机器和个人智能设备互联的增长;
- 连接供应链、合作伙伴和客户的应用扩散。

物联网 (IoT) 的先进形式 (见第 4 章) 是 “万联网” (IoE), 它是人、数据、过程、事物和服务的网络连接, 这创造了前所未有的数据量, 并允许访问一系列以前从未考虑和使用的创新服务。当这些数据被分析并且智能地与新的创新服务合并时, “万联网” 的可能性似乎是无止境的。在 Cisco 公布的白皮书 (http17 2015) 中, 已经确定了 “万联网” 的三大方向。

- 万联网将自动化系统和服务连接: 这意味着提供的服务类型将完全改变。因此, 人们不必长时间地主动与网络连接。例如, 如果老年人跌倒, 自动提醒医疗服务将信息发送到急诊站, 老年人可以从家里而不是医院或疗养院管理自己的医疗保健服务, 这是由老年人手表上的速度传感器测量的 (Wang et al. 2008)。
- 万联网将通过嵌入在传感器和设备中的智能来实现个人沟通和决策: 意味着 “万联网” 提供的服务类型, 以及它被传递给公民的方式将产生巨大变化。例如, 嵌入在传感器内的智能设备将允许滤除相关信息, 甚至将化学工厂的实际情况进行分析来向人们提出警告。
- 万联网将通过部署传感器和其他信息收集设备来发现新的信息和服务: 应用传感器融合和多传感器融合方法可以识别到目前为止的隐藏信息。

因此, “万联网” 将成为智慧城市的支柱, 因为它们依靠联系和信息来改变公民的生活质量。智慧城市的愿景是创造社区, 使之成为人们想要生活、学习、抚养孩子以及企业寻求投资的地方。这些要求由许多转型技术构成, 包括万联网。在这种情况下, 智慧城市使用信息和通信技术, 网络通讯包括互联网及其最先进的形式——万联网; 以及可以自动执行常规流程并提供快速、智能决策的传感器。这样可以在提供的功能和服务方面节省更多的效率。

智慧城市是一种基于数字战略的、介绍如何建立更多更有效的基础设施和服务的方式, 其内在的关键因素如下 (http18 2015)。

- 数字化的管理——电子政务: 确保所有适当的公共服务都在线可用, 或通过智能手机减少不必要的过程。
- 数字化信息和通信中心: 无处不在的有线和无线网络宽带基础设施为固定和移动通信,

整个城市的数字基础设施和系统以及智慧城市各个领域的互联网连接提供平台。

- 数字化的教育：能够获得教育资源和教师，并改善学生和教师之间的协作，远程访问实验室，使基于实验室的培训能够在智能数字转换教育平台上进行，平台整合了教育机构的需求。
- 数字化的网格和实用程序：通常在智能电网和油气公共事业类的实时计量和控制系统中使用，通过更有效地使用报告、更有效地供需调整以减少自然资源总量的消耗。
- 数字化的环境：确保执行所有适当的减少二氧化碳排放的活动，在门户网站上强调气候变化的影响可以更好地帮助人们理解。
- 数字化的健康关怀：通过远程电子医疗的交互、家庭监测和网络科技，使用数字智能医疗卡和医疗咨询系统，在数字预防系统和门户网站上对医疗人员的专业技能和人口增长进行监控。
- 数字化的交通和城市流动性：提高运输方式的效率、可靠性和安全性。对于道路模式而言，智能停车服务也包括在内。例如，停车点越靠近智能城市的中心，每小时成本越高；适应清晨和晚间需求的智能交通灯，在大城市会形成和管理交通控制信号灯的需求，以响应实时流量数据。此外，车辆跟踪是数字化运输中的一个重要问题。车辆跟踪系统通常由运营商操作员用于以下流程管理功能：流量跟踪、流量管理、流量调度、车载信息和安全性等。随着商业运营商的发展，城市交通运输机构也将这一技术用于多种目的，包括监测公交车遵守时间表的服务、在线路的终点触发公交车目的地标志的改变（或沿公交线路设定位置），并为乘客触发预先记录的通知。飞行模式将有智能航线入侵避免系统（Schonefeld and Möller 2012）。对于海上模式，则有船舶海上运输系统。门户和应用程序将帮助人们规划旅程，决定使用公共交通系统而不是私人交通系统，以及支持使用电动汽车和电动自行车。
- 数字化工业：确保建筑行业将初级资源的使用最小化，并延长产品的使用寿命，最大限度地减少制造过程中的废物和排放，并使用更多的能源效率自动化系统。从设计方面重新思考，这意味着产品设计不仅以成本和功能为导向，而且还必须考虑到哪些材料和组件如何在新产品中回收再利用。
- 数字化的众包：私人 and 公共机构公开发布数据集，以提高透明度，刺激创新和服务共同生产。
- 其他。

125

从更广泛的意义来讲，智慧城市将会成为全球各地未来的主流概念，它利用无处不在的通信网络、高度分布式无线传感器技术和语义 Web（在网页中包含语义内容）的力量来创建智能的新型主动服务，并迎接相应的挑战，这些服务需要向信息和通信中心传达数据，以便按需管理请求。因此，智慧城市技术必须整合、分析大量数据来预测、减轻和防止犯罪热点等严重问题。而且，基于智慧城市的骨架和万联网提供的机会，智慧城市将民众与地方政府联系在一起，鼓励更多的直接参与、互动和协作。因此，形成和构建智慧城市现实的关键因素如下所示：

- 计算机之间的网络到物体之间的网络或者那些可以形成普遍联系网络的物体代表了二十一世纪的重要基础设施。万联网允许高带宽、互联网和移动网络随时随地地进入、连接。
- 物体：
  - 拥有自己的互联网协议地址；

- 嵌入在简单和/或复杂的组件或系统中；
  - 使用传感器从环境中获取信息，例如记录供应链温度的食品；
  - 使用执行器互动，例如应对会议室里的人群的空调阀门；
  - 其他。
  - 与日常一切事务网络互连。
  - 目的是连接一切的可以自我配置的无线传感器网络。
- 在更实际的层面上，智慧社区论坛是一个出色的智慧城市典范（http:// 2015）

126

3.6 案例研究：信息物理车辆跟踪系统

分析和设计诸如车辆跟踪系统之类的信息物理系统需要预先判断它的分析或设计的系统是否是可控的、可观测的和/或可识别的。可控性、可观测性和可识别能力是系统的重要属性（见第 1 章）。关于线性系统的分析，当系统输入  $u$  可以将系统从任何初始状态到无限时间的任意状态转移时，线性系统是可控的。此外，对于任何  $t_1 > t_0$ ，当  $t_0 \leq t \leq t_1$  时，如果对于给定输出  $y(t)$  可以唯一地确定初始状态  $x(t_0)$ ，则认为线性系统是可观测的。如果一个系统的数学模型可以用状态符号表示，则说明它是可控的。可观测性和识别能力分析的方法可用于模型预测。道路交通系统是整个交通系统的重要组成部分，它不仅包括大量人造基础设施、跨越湖泊或者河流的大型桥梁、长隧道、大隧道、城市高架桥等，也包括各种各样的车辆、在复杂的运输道路环境中的人员和货物。特别是在城市交通控制系统中有大量的数字设备和信息系统以及复杂的管理和控制系统。这允许分别开发道路基础设施的信息物理系统、车辆路网协调信息物理系统、交通控制信息物理系统和信息物理车辆跟踪系统。这些应用的功能如表 3.1 所示（Jianjun et al. 2013）。

表 3.1 信息物理运输系统的功能和约束

	物理运输过程	信息技术过程	功 能
道路基础设施信息物理系统	桥梁、涵洞、隧道、路基、边坡、路边重要交通基础设施的结构改变	在大范围可信互联路谷里感知、预测、警报和监测的传感器网络	实时监测道路运输情况和天气情况
车辆协调信息物理系统	跑在路上的汽车之间、汽车与道路的协同关系和通信过程	无线、高速、高度可信、安全通信、自动驾驶	在有效接入情况下，通过高速信息交换来确保安全性
交通控制信息物理系统	道路交通系统和交通控制过程	交通控制系统模型描述、交通控制、交通行为控制指令优化计算	更安全和有效的动态道路交通控制
车辆跟踪信息物理系统	行驶在道路上的汽车和卡车、卡车与道路之间的联系、通信、交通控制过程	无线、高速、高度可信、安全、通信	在有效接入情况下，通过高速信息交换来确保车辆状况的实时监控

3.6.1 车辆跟踪系统

实现有效且安全的道路交通是开展信息物理运输系统研究的动力之一，因为它拥有关于信息物理车辆跟踪系统的基本的信息和其他物理特征。随着近年来公共和私营车辆数量的增长，这是一个重要的问题。公共交通和私人交通都面临运输越来越多乘客和货运的问题。在这个过

程中，货运必须被识别多次。日前在许多应用中，条形码系统用于识别货物和货物所属的相应车辆。但这些条形码系统有一些弱点，不可重复性、货运可能会在错误的卡车出现等。用卡车运输错误的货物意味着浪费资源。因此，无处不在的计算与嵌入式计算系统（例如卡车中的板载单元）的融合是实现大规模分布式信息物理计算系统的重要里程碑，该系统与其物理环境紧密相连。因此，射频识别（RFID；见第4章）作为无线通信的一个组成部分，在全球经济业务、过程优化、货运、运输和物流领域有重要意义。

随着最近发布的6LoWPAN（Mulligan 2007）的出现，信息物理系统与物联网的融合成为现实，因为它可以将互联网作为传感器网络的支持性基础设施，这与其和RFID系统的集成相似。这也允许跟踪货物以及卡车的位置，以便卡车在正确的目的地交货。跟踪意味着RFID读写器用于监控有RFID标签的车辆运动。关于车辆一词，是指任何用于运输货物或者乘客的物体。因此，各种托盘、叉车和其他装卸装置以及各种乘用车和货车都属于这一类别。

实施运输和物流中的RFID跟踪应用可用来收集标记货运及其运动的最新信息，来促进有效和实时的管理。因此，我们会对运输失窃或货运失误以及运输错误或出现重大延误等问题作出提醒。不应该低估这个问题，因为它对开发一个具有成功商业操作的可执行独立系统所花费的时间有很大的影响。因此，RFID可能是在这一领域取得成功的基础。

没有展示其他的科技，可以宣称相应的RFID技术还没有被建立。此外，RFID标签可抵抗环境影响，例如与其他物品的物理交互。此外，RFID支持多对象识别，可以同时读取多个标签。扩展RFID优势是可能的，但是当使用该技术进行车辆跟踪时，还必须牢记一些潜在的缺点。

为了减轻RFID实施不成功的风险，应进行全面的需求分析。

3.6.2 基于RFID的车辆跟踪系统

车辆跟踪系统通常被运营商使用在流量跟踪、流动路由、流量调度、车载信息 and 安全性等方面。随着商业运营商的发展，城市交通运输机构也将这一技术用于多种目的，包括监测公交车在服务中的时间表遵守情况，引发公交车终点站点显示（或其他设备位置沿线）的更改，并触发预先记录的乘客通知。

关于上述提到的情况，车辆跟踪系统也可以理解为国家保险犯罪局（NICB）为防止机动车辆被盗窃而推荐的分层车辆保护方法的一个组成部分。这种方法（在这里不考虑）要求四个基于特定车辆的关于危险因素的安全层。车辆跟踪系统是其中一层，NICB认为这对警察追回被盗车辆非常有帮助。

为了研究基于RFID的车辆跟踪的要求，几个RFID车辆跟踪应用案例有待进一步考虑。它们是：

- 跟踪标记的负载单元作为物流和供应链管理的一部分；
- 在道路系统中实施RFID车辆跟踪。

为了说明这两种情况，图3.7提供了一个简化图，其展示了常见的RFID系统结构及其与其他系统组件的相互作用（Deriyenko 2012）。

第一个跟踪应用程序属于物流和货运供应链。当货物在经过业务流程时，它们被分步跟踪。为了实现更好的透明度，每次当货运到达和离开一个阶段都要执行跟踪。

还有很多种方法通过将它们整合到道路系统中去应用RFID系统。第一个例子是芬兰铁路运营商（Wessel 2011）用RFID实施的货车跟踪。在铁路上设置读写器，可以在特定的时刻生

127  
、  
128

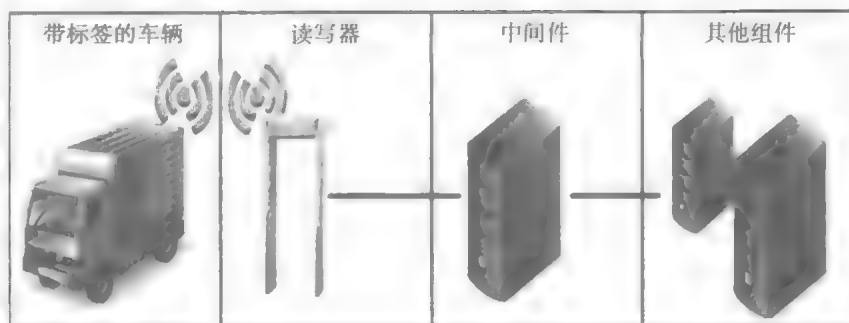


图 3.7 基于 RFID 的车辆跟踪系统 (Deriyenko 2012)

成更精确的列车位置信息。在道路系统上使用 RFID 系统的另一种方法是收费公路的自动收费系统，它可以克服收费点上的交通堵塞严重等问题，降低劳动力成本 (Xiao et al. 2008)。该系统包括通常固定在移动车辆的挡风玻璃或保险杠上的 RFID 标签的车载单元和位于收费站的 RFID 读写器。为了确保系统的有效工作，每个标签应与相应的支付账户关联。在晴天的情况下，随着标记车辆进入收费区域，并且通过读写器，要求其标签提供验证信息。一旦读写器读取信息，就会从连接的账户中扣取费用。

在道路系统中使用 RFID 的其他示例是管理停车场和加油站 (Pala and Inan 2007; Mathis 2012)。然而，这些方法与道路收费系统的示例十分相似。

### 3.6.3 需求分析

基于 RFID 的车辆跟踪系统的需求分析是必不可少的，一方面要找出最相关的制度约束，另一方面是在进行系统设计时找出必要的知识，包括 RFID 读写器、RFID 标签和 RFID 中间件。但是，基于 RFID 的车辆跟踪系统不仅需要收集数据，同时它也需要根据特定的商业操作规则来预处理它们。在此背景下，需求分析是基于分析现有的研究项目和研究论文的。此外需明确以下的要求 (Deriyenko 2012)。

- 集成：基于 RFID 的车辆跟踪系统的主要目标是以合适的形式及时地给运输与物流中的利益相关者提供有价值的、完整的、可信赖的信息。在有些情况下，十分有用的是创建一个组合了 RFID 标签和读写器的基于大量生成数据的用于车辆跟踪结果的系统。把这些数据集合起来，并把它们分别存储，这并没有什么意义，它必须呈现给用户。这些结果明显地说明，基于 RFID 的车辆跟踪系统必须和企业信息系统组件相结合来提供企业更深程度上的应用数据。
- 数据清理：以数据最初的形式收集的数据有可能不是用户友好的，对用户也不会有很大价值。由于这个原因，在大多数情况下根据特定的业务需求，进行预处理是十分必要的。因此，中间件（见图 3.7）不仅应该是互联总线的一部分，也应执行以下核心功能：数据清除、删除重复、排序、安排针对选定的间隔级别的数据，并进行其他预处理操作、准备用于相应的业务使用的数据。
- 高吞吐量：运用 RFID 组件最初的目的是为了增加系统的吞吐量；因此，在特定时间对大量车辆进行追踪是车辆跟踪的核心要求。很显然，这个要求的重要性和具体的指示物直接依赖于特定的业务需求，并且受限于它的账户，特别是那些可使用的预算资源。
- 实时操作：伴随着让大量数据快速运行的能力，RFID 的车辆跟踪系统应该有可行的方



法向客户提供数据。在大多数情况下，被车辆追踪系统收集起来的回顾性数据中，有关于业务执行的合适的值，但是它的重要性不及真实获得的数据。对车辆跟踪而言，对读写器接收的有短响应时间的信息进行更新是一个至关重要的要求。然而，更新率会因为业务操作特性而产生波动。考虑到在使用情况下的收费，显然不应该存在没有意义的因为车辆数据的延误所支付的费用。对于物流和供应链管理也是一样的道理，用户应该能够获得有关车辆运动的最新信息，否则，整个系统就失去了它的优势。因此，整个 RFID 车辆跟踪系统必须保证很短的响应时间。至于图 3.7，这一要求需要其他企业的系统组件，而不仅仅是这个使用情况中所考虑到的。

- 可靠性：RFID 系统的可靠性取决于许多影响因素，包括射频干扰、技术基础设施、读写器和标签配置及放置等。一般情况下，跟踪过程中出现的问题可以大致分为两组——误报和漏报。误报的名称来自于它们的起源，这是在系统处理项目的情况下，而在现实中，它不应考虑。因此，系统中的项目存在误报的情况实际上是错误的。这可能是由于几个原因造成的。一方面，它可能出现一个项目被相同或不同的读写器扫描两次这种情况。在文献中提到解决这个问题的方法之一是强制仅当在第一个数字与读写器请求的数字匹配的情况下才响应。然而，这个解决方案使整个系统更加不堪重负。另一方面，如果的阅读范围是重叠的，那么避免其信号碰撞是很重要的。另一个可以识别的情况是扫描一个标签，该标记应该位于读者阅读范围之外。因此，标签和读写器的位置应该得到适当的控制，同时使用两种设备的技术指标以及环境细节。

131

然而，之前所提到的一些问题可以由数据预处理得到一定程度的解决。但总的来说，RFID 车辆跟踪系统应嵌入一项功能，使用有效的解决方案和请求算法以及其他适当的方法来减少实时广播的误报量。

其中一个最常见的问题，属于漏报类别是由于存在的金属或水，它们会影响标签的可读性，这两种情况都有可能出现问题。原因是非常简单的，因为运输标签的负载可能包含托盘运载，例如，瓶子与水。并且汽车的跟踪失效可能导致许多不便和导致另外的业务操作费用。

为了克服这些问题，可能有几个合理的解决方案，例如，使用金属作为天线或改变天线阻抗。无论如何，无论使用哪种方法，RFID 车辆跟踪系统都应该能够克服诸如金属和水等障碍物对标签读取的妨碍。

此外，如果它的一些组成部分出现故障，RFID 车辆跟踪系统必须能够检测到。这意味着它必须有适当的用户通知算法。正如之前所提到的，读写器可以使用标记标识号的第一位来执行请求。从理论上讲，这种方法可以帮助找出必要的标记缺失或失败。但是，这个解决方案不适用于 RFID 车辆跟踪的所有情况，因为应该将所有标签的标识存储在系统中。

例如，它可以帮助检测是否缺少某个加载托盘或标记不可读，但由于明显的原因，这对于收费的收集用例是不可行的。但是，在后一种情况下，缺少标记功能是没有必要的，因为标签的缺席或故障必定会被检测出来，因为如果没有它，汽车将不能通过检测门。无论如何，上面提到的要求都是可选的，不仅指标签监控，还有读写器和中间件。

132

3.6.4 进一步的研究

本案例研究的主要目的是介绍信息物理车辆跟踪和对 RFID 车辆跟踪有关的信息物理和普适计算系统的方法要求的总结 (Moeller et al. 2015)。所确定的更高级别的要求可用于进一步调查和更深入的细节。与此同时，RFID 技术在不断提高其市场占有率和进入新领域的应用。



因此,需求分析不能是一个一次性的行动,它必须具有连续的特性。因此,在这一领域的进一步研究将会得到更多的支持。

### 3.7 练习

1. 术语信息物理系统是什么意思?
2. 请描述信息物理的特征。
3. 术语物联网是什么意思?
4. 请描述物联网的特征。
5. 术语物理世界是什么意思?
6. 请描述物理世界的特征。
7. 术语虚拟世界是什么意思?
8. 请描述虚拟世界的特征。
9. 术语系统工程是什么意思?
10. 请描述系统工程的特征。
11. 术语软件工程是什么意思?
12. 请描述软件工程的特征。
13. 术语机器对机器通信是什么意思?
14. 请描述机器对机器通信的特征。
15. 术语无线网络是什么意思?
16. 请描述无线网络的特征。
17. 术语是无线传感器网络什么意思?
18. 请描述无线传感器网络的特征。
19. 术语 IPv6 是什么意思?
20. 请描述这种多样化地址的优势。
21. 术语无线体域网是什么意思?
22. 请描述无线体域网的特征。
23. 术语微机电网络是什么意思?
24. 请描述微机电网络的特征。
25. 术语通过价值网络的横向整合是什么意思?
26. 请描述其特征。
27. 术语制造系统中的垂直整合是什么意思?
28. 请描述其特征。
29. 术语智慧城市是什么意思?
30. 请描述智慧城市的特征。
31. 术语万联网是什么意思?
32. 请描述万联网的特征。
33. 术语数字化传输是什么意思?
34. 请描述数字化传输的特征。
35. 术语数字化健康管理是什么意思?
36. 请描述数字化健康管理的特征。
37. 术语数字化网络和公共设施是什么意思?
38. 请描述其特征。
39. 术语数字化工业是什么意思?
40. 请描述数字化工业的特征。
41. 术语数字化众包是什么意思?
42. 请描述数字化众包的特征。
43. 术语车辆跟踪是什么意思?
44. 请描述信息物理车辆跟踪系统的特征。

### 参考文献

- (Abelson and Sussman 1996) Abelson, H., Sussman, G. J.: Structure and Interpretation of Computer Programs. MIT Press, 1996
- (Askin and Standridge 1993) Askin, R. G., Standridge, C. R.: Modeling and Analysis of Manufacturing Systems, John Wiley Publ. 1993
- (Banerjee et al. 2011) Banerjee, A., Gupta, S. K. S., Fainekos, G., Varsamopoulos, G.: Towards modeling analysis of cyber-physical medical systems. In: Proceed. 4th International Symposium on Applied Sciences in Biomedical Communication technologie (ISABEL), pp. 154–158, 2011
- (Berger 2013) Berger 2013. Connected Mobility 2025 by Roland Berger Consultants, 01/2013
- (Burns and Wellings 2001) Burns, A., Wellings, A.: Real-Time Systems and Programming Languages. Addison Wesley Publ., 2001
- (Cascetta 2009) Cascetta, E.: Transportation Systems Analysis, Springer Publ. New York, 2009 (Manheim 1979)
- (Chen et al. 2011a) Chen, M., Gonzalez, S., Vasilakos, A., Cao, H., Leung, V.: Body Area Networks: A Survey. ACM/Springer Mobile Networks and Applications, Vol. 16, No. 2, pp.171–193, 2011
- (Chen et al. 2011b) Chen, M., Leung, V., Huang, X., Balasingham, I., Li, M.: Recent Advances in Sensor Integration. International Journal of Sensor Networks, Vol. 9, No. 1, pp.1–2, 2011
- (Davis 2011) Davis, A., M.: Riquirements Bibliography; <http://www.reqbib.com/>
- (Elsheikh et al. 2013) Elsheikh, A., Awais, M. U., Widl, E., Palensky, P.: Modelica-enabled rapid prototyping of cyber-physical energy systems via the functional mockup interface. In: IEEE Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems. 2013, DOI: 10.

- 1109/MSCPES.2013.6623315
- (Deriyenko 2012) Deriyenko, T.: RFID Application in Vehicle Tracking, project work in ITIS class Internet of Things, TU Clausthal, 2012
- (Don and Dugki 2013) Don, S., Dugki, M.: Medical cyber-physical systems and bigdata platforms. In: Proceed. Medical Cyber-Physical Systems Workshop, 2013
- (Farhangi 2010) Farhangi, H.: The path of the smart grid. IEEE Power and Energy Magazine, Vol. 8, pp. 18–28, 2010
- (Fidêncio and Cota 2014) Fidêncio, A. X., Cota, E.: Smart Traffic Light: A Simulation Model. Student Project Work, TU Clausthal, Germany, 2014
- (Fischer 2013) Fischer, K.: High Assurance Cyber Military Systems (HACMS), DARPA Report 5/20/13
- (Garlan et al. 2000) Garlan, D., Monroe, R. T., Wile, D.: Acme: Architectural Description of Component-Based Systems – Foundations of Component-Based Systems. Cambridge University Press, 2000
- (Geisberger and Broy 2012) Geisberger, E., Broy, M.: Integrated Research Agenda Cyber-Physical Systems (in German), Springer Publ. 2012
- Garland, M., Le Grand, S., Nickolls, J., Anderson, J., Hardwick, J., Morton, S., Phillips, E., Zhang, Y., Volkov, V.: Parallel Computing Experiences with CUDA. Micro IEEE, Vol. 28, No. 4, pp. 13–27, 2008
- Gloy, Y.-S.: Modellbasierte Selbstoptimierung des Webprozesses, PhD Thesis, RWTH Aachen 2012, Published by Shaker Verlag 2013
- (Gloy and Schwarz 2015) Gloy, Y. -S., Schwarz, A.: Cyber-Physical Systems in Textile production – the next industrial revolution? [http://www.textile-future.com/textile-manufacturing.php?read\\_article=1829](http://www.textile-future.com/textile-manufacturing.php?read_article=1829)
- (Gokhale et al. 2010) Gokhale, A., McDonald M. P., Drager, S., McKeever, W.: A Cyber Physical System Perspective on the Real-time and Reliable Dissemination of Information in Intelligent Transportation Systems. In: Network, Protocols and Algorithms, Vol. 2, No. 3, pp. 116–136, 2008
- (Haque et al. 2014) Haque, A. A., Aziz, S. M., Rahmann, M. : Review of Cyber-Physical Systems in Helathcare. In: International Journal of Distributed Sensor Networks, Vol. 2014, Article ID 217415, 20 pages, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/217415>
- (Ilic et al. 2008) Ilic, M. D., Le, X., Khan, U. A., Moura, J. M. F.: Modeling Future Cyber-Physical Energy Systems. In: IEEE Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, pp. 1–9, 2008, and DOI:10.1109/PES.2008.4596708
- (Industrie 4.0 2015) Industrie 4.0 2015. Secretariat of the Platform Industry, Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0, Final report of the Industry4.0 Working Group, 2013
- (Iso-Ketola 2008) Iso-Ketola, P., Karinsalo, T., Vanhala, J.: HipGuard: a wearable measurement system for patients recovering from a hip operation. In: Proceed. 2nd Internat. Conference on Pervasive Computing Technologie in Healhcare, pp. 196–199, 2008
- (Jehle 2014) Simulation of a Traffic Light Junction. Student Project Work, TU Clausthal, 2014
- (Jianjun et al. 2013) Jianjun, S., Xu, W., Jizhen, G., Yangzhou, C.: The analysis of traffic control cyber-physical systems. In: Procedia – Social and Behavioral Sciences, Vol. 96, pp. 2487–2496, 2013
- (Kailanto et al. 2008) Kailanto, H., Hyvärinen, E., Hyttinen, J. : Mobile ECG measurement and analysis system using mobile phone as the basis station. In: Proceed. 2nd International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare, pp. 12–14, 2008
- (Khaitan, et al. 2015) Khaitan, S. K., McCalley, J. D., Liu, C-C., Eds.: Cyber-Physical Systems – Approach to Smart Electric Power Grid, Springer Publ. 2015
- (Konstantas and Herzog 2003) Konstantas, D., Herzog, R.: Continuous Monitoring of vital constans for mobile users: the MobiHealth approach. In. Proceed. 25th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, pp.3728–3731, 2003
- (Kottenstette et al. 2008) Kottenstette, N., Koutsoukos, X., Hall, J., Sztipanovits, J., Antsaklis, P.: Passivity-based design of wireless networked control systems for robustness to time-varying delays. In: Proc. Real-Time Systems Symposium, pp. 15–24, 2008.
- (Krogh et al. 2008) Krogh, B. H., Lee, E., Lee, I., Mok, A., Pappas, G., Rajkumar, R., Sha, L. R., Vincentelli, A. S., Shin, K., Stankovic, J., Sztipanovits, J., Wolf, W., Zhao, W.: Cyber-Physical Systems: Executive Summary, 2008

- (Lasseter 2002) Lasseter, R.: Microgrids. In: IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. 1, pp. 305–308, 2002
- (Lee 2008) Lee, E. A.: Cyber-Physical Systems: Design Challenges. Technical Report No. UCB/EECS-2008-8, 2008
- (Lee et al. 2012) Lee, I., Sokolsky, O., Chen, S.: Challenges and research directions in medical cyber-physical systems, In: Proc. IEEE, Vol. 100, No. 1, pp. 75–90, 2012
- (Lemmon and Venkataramanan 2009) Lemmon, P. C. M. D., Venkataramanan, G.: Position paper – using microgrids as a path towards smart grids. In: New Research Directions for Future Cyber-Physical Energy Systems, 2009.
- (LeValley 2013) LeValley, D.: Autonomous Vehicle Liability – Application of Common Carrier Liability. Seattle Univ. Law Report, Vol 36, pp.5–26, 2013
- (Li et al. 2011) Li, W., Jagtap, P., Zavala, L., Joshi, A., Finin, T. : CARE-CPS : Context-Aware Trust Evaluation for Wireless Networks in Cyber-Physical System using Policies. In: Proceed. IEEE International Symposium on Policies for Distributed Systems and Networks (POLICY), pp. 171–172, 2011
- (Lin et al. 2010) Lin, J., Sedigh, S., and Miller, A.: Modeling cyber-physical systems with semantic agents. In: Proc. IEEE 34th Annual Computer Software and Applications Conference Workshops (COMPSACW), pp. 13–18, 2010
- (Liu 2000) Liu, J. W. S.: Real-Time Systems. Prentice Hall Publ., 2000
- (Liu et al. 2012) Liu, J. Kou, T., Chen, Q., Sherali, H. D.: On Wireless Network Infrastructure Optimization for Cyber-Physical Systems in Smart Buildings. In: Wang, X. L., Zheng, R., Jing, T., Xing, K. (Eds.): Lecture Notes Computer Science 7405, pp. 607–618, Springer Publ. 2012
- (López-Nores et al. 2008) López-Nores, M., Pazos-Arias, J. J., Garcia-Duque, J., Blanco-Fernández, Y. : Monitoring medicine intake in the networked home : the iCabiNet solution. In: Proceed. 2nd International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare, pp. 116–117, 2008
- (Lounis et al. 2012) Lounis, A., Hadjidi, A., Bouabdallah, A., Challal, Y. : Secure and scalable cloud-based architecture for e-health Wireless sensor networks. In: Proceed. International Conference on Computer Communication Networks (ICCCN), pp. 1–8, 2012
- (Macana et al. 2011) Macana, C. A., Quijano, N., Mojica-Nava, E.: A Survey on Cyber Physical Energy Systems and their Applications on Smart Grids, IEEE, 2011, DOI: 10.1109/ISGT-LA.2011.6083194 Conference: ISGT-LA 2011
- (Mathis 2012) Mathis, R.: Neste Oil launches automated vehicle identification at fueling stations, 2012. [Online]. <http://secureidnews.com/news-item/neste-oil-launches-automatedvehicle-identification-at-fueling-stations/>
- (Mendez and Ren 2012) Mendez, E. O., Ren, S.: Design of cyber-physical interface for automated vital signs reading in electronic medical record systems. In: Proceed. IEEE International Conference on Electro/Information Technology (EIT), 2012
- (Milenković et al. 2006) Milenković, A., Otto, C., Jovanov, E.: Wireless sensor networks for personal health monitoring: Issues and an implementation. In: Computer Communications, Vol. 29, No. 13–14, pp. 2521–2533, 2006.
- (Möller 2013) Internet of Things, Lecture ITIS Study Program TUC, 2013, <http://video.tu-clausthal.de/vorlesung/408.html>
- (Moeller et al. 2015) Möller, D. P. F.: Introduction to Transportation Analysis, Modeling and Simulation. Springer Publ. 2014
- (Moeller et al. 2015) Moeller, D. P. F., Deriyenko, T., Vakilzadian, H.: Cyber Physical Vehicle Tracking System: Requirements for using Radio Frequency Identification Technique. In: Proceed. IEEE EIT, 2015
- (Mulligan 2007) Mulligan, G.: The 6LoWPAN architecture, In: EmNets Proceed. 4th Workshop on Embedded Networked Sensors, pp. 78–82, ACM, 2007
- (Niku 2001) Niku, S. B.: Introduction to Robotics, Prentice Hall Publ. 2001
- (Ning 2013) Ning, H.: Unit and Ubiquitous Internet of Things, CRC Press, 2013
- (NITRD 2009) NITRD 2009. High Confidence Medical Devices: Cyber-Physical Systems for 21st Century Health Care. NITRD published by National Science Foundation 2006
- (Pala and Inanc 2007) Pala, Z., Inanc, N.: Smart Parking Applications Using RFID Technology. In RFID Eurasia, 1st Annual Conference, 2007; DOI: 10.1109/RFIDEURASIA.2007.4368108
- (Palensky et al. 2014) Palensky, P., Widl, E., Elsheikh, A.: Simulating-cyber physical energy systems: challenges, tools, and methods. In: IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Part C (Applications and Reviews), Vol. 44, No. 3, pp. 318–326, 2014, and DOI: 10.1109/TSMCC.2013.2265739

- (PCAST 2007) PCAST 2007. PCAST: Leadership under Challenge: Information Technology R&D in a Competitive World, PCAST by Executive Order 13226, Published 2007
- (Pellizzoni 2015) Pellizzoni, R.: Cyber-Physical Systems: [www.engineering.waterloo.ca](http://www.engineering.waterloo.ca); accessed January 2015
- (Perumal et al. 2012) Perumal, B., Rajasekaran, P., Ramalingan, H. M.: WSN integrated Cloud for Automated Telemedicine (ATM) based e-healthcare applications. In: Proceedings of the 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Technology (IPCBBE), Vol. 29, pp. 166–170, 2012
- (Raihans et al. 2005) Raihans A., Cheng, S.-W., Schmerl, B., Garlan, D., Krogh, B. H., Agbi, C., Bhav, A.: An Architectural Approach to the Design and Analysis of Cyber-Physical Systems. Electronic Communications of the EECST, Vol. 21, pp.1–10, 2009
- (Randell et al. 1995) Randell, B., Laprie, J.C., Kopetz, H., Littewoods, E., Eds.: Predictably Dependent Computing Systems, Springer Publ. 1995
- (Sammon and Caverly 2007) Sammon, J. P. and Caverly, R. J.: Transportation Systems, US Department of Homeland Security, USA, 2007
- (Sammon and Caverly 2007) Schmerl, B., Garlan, D.: AcmeStudio: Supporting Style-Centered Architecture Development. In: Proceedings of the 26th International Conference on Software Engineering, Scotland, 2004
- (Schneider et al. 2012) Schneider, D., Holtermann, T., Neumann, F., Hehl, A., Aach, T., Gries, T.: In: Proceed. 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, pp. 1494–1499, 2012. DOI: 10.1109/ICIEA.2012.6360960
- (Schönefeld and Möller 2012) Schönefeld, J., Möller, D. P. F.: Runway incursion prevention systems: A review of runway incursion avoidance and alerting system approaches. In: Progress in Aerospace Sciences, Vol. 51, pp. 31–49, 2012
- (Seitz et al. 2007) Seitz, N., Kameas, A., Mavrommati, I., Eds.: The Disappearing Computer, Springer Publ., 2007
- (Selke 2014) Selke, G.: Design and Development of a GPU-accelerated Micromagnetic Simulator. PhD Thesis, University of Hamburg, 2014
- (Tiller 2001) Tiller, M. M.: Introduction to Physical Modeling with Modelica, Kluwer Academic Publ., 2001
- (Torin 2007) Torin, M.: “War Rooms” of the Street: Surveillance Practices in Transportation Control Centers. Communication Review 10 (4): 367–389 2007
- (Wan et al. 2012) Wan, J., Li, D., Zou, C., Zhou, K.: M2M Communications for Smart City: An Event-based Architecture. In: Proc. 12th IEEE Internat. Conf. on Computer and Information Technology, pp. 895–900, 2012
- (Wan et al. 2013) Wan, J., Chen, M., Xia, F., Li, D., Zhou, K., Liang, K.: From Machine-to-Machine Communications towards Cyber-Physical Systems, ComSIS Vol. 10, No. 3, pp. 1105–1128, 2013
- (Wang et al. 2008) Wang, C. C., Chiang, C. Y., Lin, P. Y.: Development of a fall detecting systems for the elderly residents. In: Proceed. 2nd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, pp. 1359–1362, 2008
- (Weiland and Purser 2000) Weiland, R. J., Purser, L. B.: Intelligent Transportation Systems. In: Transportation Research Board, 2000
- (Wessel 2011) Wessel, R.: Finnish railroad streamlines operations, 2011. <http://www.rfidjournal.com/articles/view?8594>
- (Wood et al. 2008) Wood, A. D., Stankovic, J. A., Virone, G.: Context-aware wireless sensor networks for assisted living and residential monitoring. In. IEEE Network, Vol. 22, No. 4, pp.26–33, 2008
- (Wu et al. 2011) Wu, F. J., Kao, Y. F., Tseng, Y. S.: From wireless sensor networks towards cyber physical systems,” In: Pervasive and Mobile Computing, Vol. 7, No. 4, pp. 397–413, 2011
- (Xiao et al. 2008) Xiao, Z., Guan, Q., Zheng, Z.: The Research and Development of the Highways Electronic Toll Collection System, In: Proceed. 1st International Workshop on Knowledge Discovery and Data Mining, pp. 359–362, 2008
- (Yang 2006) Yang, T.: Networked control system: a brief survey. Control Theory and Applications, IEE Proceedings, Vol. 153, no. 4, pp. 403–412, 2006
- (Zhai 2007) Zhai, J., Zhou, Z., Shi, Z., Shen, L.: An Integrated Information Platform for Intelligent Transportation Systems Based on Ontology, In: IFIP Vol. 254, Research and Practical Issues of Enterprise Information Systems, pp. 787–796, Eds. I. Xu, A. Tjoa, S. Chaudhary, Springer. Pub. 2007
- (Zhang et al. 2009) Zhang, F., Shi, Z., Wolf, W.: A dynamic battery model for codesign in cyber-

physical systems. In: Proc. 29th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems Workshops, ICDCS, pp. 51–56, 2009

(Zhao and Cao 2008) Zhao, J., Cao, G.: VADD: Vehicle-Assisted Data Delivery in Vehicular Ad Hoc Networks. In: IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 57, No. 3, pp. 1910–1922, 2008

链接

(http1 2015) <http://www.heise.de/netze/rfc/rfcs/rfc2460.shtml>; accessed January 31st 2015

(http2 2015) <http://tools.ietf.org/html/rfc3513>; accessed January 31<sup>st</sup> 2015

<http://cyberphysicalsystems.org/>; accessed January 31st 2015

(http4 2015) [http://www.research.ibm.com/haita/conferences/hvc2012/papers/HVC2012Eldad\\_Palachi.pdf](http://www.research.ibm.com/haita/conferences/hvc2012/papers/HVC2012Eldad_Palachi.pdf); accessed January 31st 2015

(http5 2015) <http://www.sysml.org/>; accessed January 31st 2015

(http6 2003) <http://www.eclipse.org/whitepapers/eclipse-overview.pdf>, 2003; accessed January 31st 2015

(http7 2015) [http://en.wikipedia.org/wiki/DARPA\\_Grand\\_Challenge\\_%282007%29](http://en.wikipedia.org/wiki/DARPA_Grand_Challenge_%282007%29); accessed January 31st 2015

(http8 2015) <http://www.darpa.mil/newsevents/releases/2012/04/10.aspx>; accessed January 31st 2015

(http9 2015) <https://www.youtube.com/watch?v=AQXvM6Am6BQ>; accessed January 31st 2015

(http10 2015) <https://www.premierway.com/products/smartercommerce/e-com-merce-and-mobile-sales>; accessed January 31st 2015

(http11 2015) [http://en.wikipedia.org/wiki/Requirements\\_engineering#cite\\_note-5](http://en.wikipedia.org/wiki/Requirements_engineering#cite_note-5); accessed January 31st 2015

(http12 2015) <http://en.wikipedia.org/wiki/Interoperability>; accessed January 31st 2015

(http13 2015) <http://docs.nvidia.com/cuda/index.html>; accessed January 31st 2015

(http14 2015) <https://www.securityforum.org/shop/p-71-173>; accessed January 31st 2015

(http15 2015) <http://www.engadget.com/2010/10/28/medtronic-debuts-tiny-lead-less-pacemaker-at-tedmed-2010/>; accessed January 31st 2015

(http16 2015) [http://www.darpa.mil/Our\\_Work/I2O/Programs/High-Assurance\\_Cyber\\_Military\\_Systems\\_%28HACMS%29.aspx](http://www.darpa.mil/Our_Work/I2O/Programs/High-Assurance_Cyber_Military_Systems_%28HACMS%29.aspx); accessed January 31st 2015

(http17 2015) <http://www.cisco.com/web/solutions/trends/iot/overviews.html>; accessed January 31st 2015

(http18 2015) [http://www.cisco.com/web/strategy/docs/Is\\_your\\_city\\_smart\\_enough-Ovum\\_Analyst\\_Insights.pdf](http://www.cisco.com/web/strategy/docs/Is_your_city_smart_enough-Ovum_Analyst_Insights.pdf); accessed January 31st 2015

(http19 2015) <http://www.intelligentcommunita.org>; accessed January 31st 2015; accessed January 31st 2015

## 物联网概述

本章 4.1 节将会对物联网进行简要的介绍，并指出物联网的支撑技术。4.2 节介绍了射频识别（RFID）技术，这是一种无线自动识别技术，可以让一个携带了 RFID 标签的物体被 RFID 读识器所识别。4.3 节介绍了无线传感器网络的主要概念，这种技术已经应用到了远程环境监测和目标跟踪等应用中。随着传感器的体积越来越小、成本逐渐降低和智能化程度不断提高，无线传感器网络技术也随之不断地发展和完善。4.4 节介绍了电力线通信技术，通过这项技术可以在现有的电力线上传送数据。连接电力线的电子设备不仅可以获取电能，还可以以半双工的方式控制或接收数据。4.5 节介绍了 RFID 的相关应用。4.6 节介绍了一个基于物联网的研究案例。4.7 节包含了本章的习题。本章最后附上了参考文献和阅读建议。

## 4.1 物联网

因特网是由互联的计算机网络组成的一个全球网络系统，它使用标准互联网协议套件（TCP/IP）服务全球数十亿网络用户。它由数百万私有网络、公有网络、学术网络、商用网络以及政府网络组成，并覆盖了从本地到全球的巨大范围。因特网起源于 20 世纪 70 年代的 ARPANET，在 80 年代初步建成使用，并在 90 年代逐渐流行起来。物联网（Internet of Things, IOT）是指把普通物理对象通过网络互联起来。如今，物联网技术已经成为实现以普适计算和普适网络为特征的智慧地球的主要途径，通常描述为以万物互联为目标的具有自配置能力的无线传感器网络。这个概念最初由成立于 1999 年的美国麻省理工学院 Auto-ID 实验室所提出，该实验室由 Kevin Ashton、David Brock 和 Sanjay Sarma 创建，主要致力于研究一种物品的唯一标识，并设计了产品电子代码（Electronic Product Code, EPC），它是一种基于 RFID 技术的全球物品标识系统，其目的是替代通用产品码（Universal Product Code, UPC）（Auto-ID 2013）。如今，Auto-ID 实验室已经成为在网络化 RFID 领域全球领先的学术研究实验室，它由位于四个大洲的七所世界知名研究型大学组成，这些实验室由 Auto-ID 中心和 EPCglobal 共同挑选出来，致力于共同构建物联网（IOT 2013）。

现实世界中的每一个物体、对象或者实体都可能是组成物联网的一部分。物联网最初的主要目标是为了结合以数据传输为特征的通信功能，其主要对象是 RFID，因此可以认为物联网是由 RFID 标签作为基础建立起来的：在因特网之上建立的无线层。由计算机组成的网络与由互联实体组成的网络互相通信，可以追踪并统计出成千上万的物体，联网的物体可以是一个刮胡刀、银行账单，甚至是汽车轮胎。这些通常拥有 IP 地址的物体可以被嵌入到更加复杂的系统中，并且能够使用传感器从周边环境获取信息。例如，食物产品可以记录其在运输时的温度，甚至可以调节自身温度，又如，空调能够在检测到有人时做出适当的响应行为。

随着移动设备的广泛使用，信息和通信网络的规模显著地增长。全球范围内接入网络的移动设备数量在 2005 年年中突破了 20 亿，到 2015 年大约为 250 亿，如表 4.1 所示。

从表 4.1 中可以看到，当互联的设备数量超过连接到这些设备的人的数量时，物联网时代就会到来。这会给当今世界带来巨大改变，包括我们每个人的生活，因为保持互联已经成为数百万人生活密不可分的一部分。物联网已经成为全球经济中的一个重要概念，因为无线技术使

人们可以随时随地通过物联网进行交互，具有高度社会与商业价值的泛在商品和服务也会得到巨大的发展机会。在物联网的革命性发展过程中，全社会的参与尤其是通过结合新应用领域进行价值创造是至关重要的，例如在工业制造、能源网络、健康医疗设备和交通系统等方面。

表 4.1 在第三次计算浪潮下与世界人口密切相关的互联设备数量

年 份	2003	2010	2015	2020	增长趋势
世界人口	$6.3 \times 10^9$	$6.8 \times 10^9$	$7.2 \times 10^9$	$7.6 \times 10^9$	+20.6349%
互联设备	$500 \times 10^6$	$12.5 \times 10^9$	$25 \times 10^9$	$50 \times 10^9$	$+10^2$
每个人的互联设备	0.0793%	1.8382%	3.4722%	6.5789%	+82.9621%

142

便利的因特网、先进的软件和电信服务，以及无论何时、无论通过何种媒介都能让任意物体进行互联的能力，这些技术都促进了物联网系统在全世界范围的普及，尤其是“任何对象或物体都能成为接入到网络微型计算机或微型芯片的一部分”的基本技术发展已经超出了预想。物联网典型的支撑技术有：

- RFID；
- 传感器和执行器；
- 微型化技术；
- 纳米技术；
- 智能实体。

除此之外，微型化网络设备的计算能力的不断增强也促进了物联网的发展。RFID 和传感器以及其他的技术已经得到大量应用，使得真实世界的物理环境能够嵌入到物联网的网络化服务中。实体到实体的物联网应用可以根据自身所处的环境进行自动实时的检测和响应，于是就产生了智能物体，这些物体配有独一无二的身份识别标签，并且装备有传感器和执行器。同时，这些智能物体的产生也会带来一些问题（Chaouchi 2010）：

- 编址、身份识别以及命名；
- 传输模型的选择；
- 互联物体的通信模型；
- 物体的互联技术；
- 经济因素影响及电信资费变化；
- 物体间的互操作性；
- 与现有模型的交互，比如与互联网；
- 安全及隐私问题；
- 其他。

大多数因特网服务被用来满足人与人之间的交互，与之相反，物联网服务靠着对互联实体的简单定位和跟踪，使人与任意物体之间（或任意物体之间）能够在任意时间和任意地点进行互联。物联网的相关特性如下。

- 连通性：产生并处理物联网中的数据流量。实体间可以通过无线互联，例如使用 RFID 技术（见 4.2 节），也可以使用有线互联，例如使用电力线通信技术（见 4.5 节）。物联网也允许异构实体间进行互联。
- 连接作用：创建并扩大包含各类网络和物联网的全新动态网络。物联网既不是科幻小说，也不是行业炒作，而是以坚实的技术进步为基础，并对无处不在的网络这一愿景的积极实现。

143

- 嵌入式：把类似于智能手机中的短距离移动收发器置于日常物品中，使得人与物之间的通信，甚至是物体间的通信成为可能。

在一份 2005 年的联合国报告中指出，“今天，在 21 世纪，我们正在进入一个互联无处不在的新时代，接入互联网的用户将会达到数以十亿计，与通信设备的数量相比，人类用户在这些接入网络的对象中可以算是少数群体了”（Biddlecombe 2005）物联网的技术路线如图 4.1 所示（[http://en.wikipedia.org/wiki/Internet\\_of\\_Things](http://en.wikipedia.org/wiki/Internet_of_Things)）。

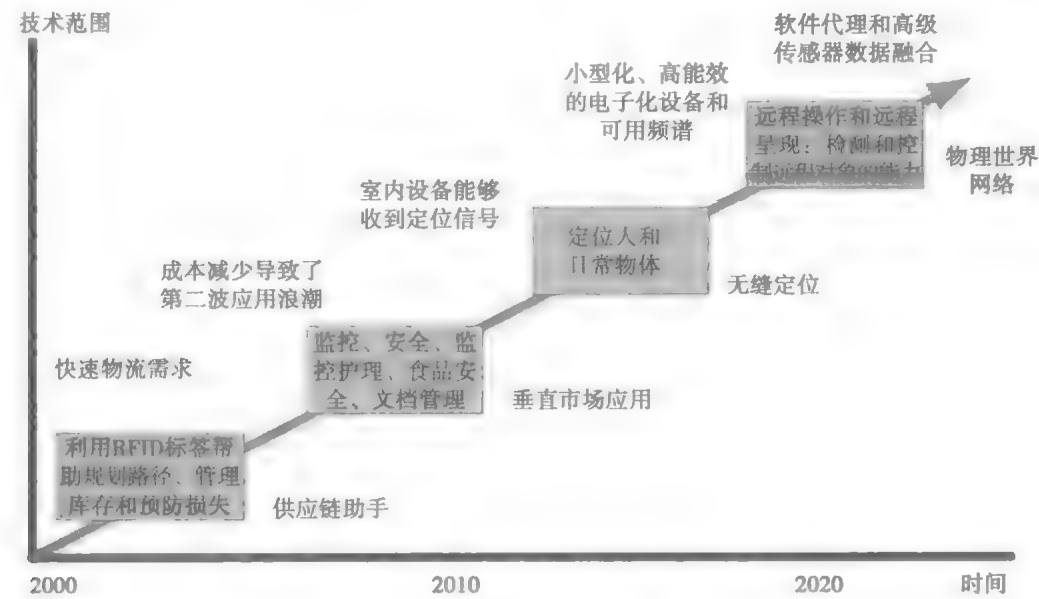


图 4.1 物联网的技术路线

来源：SRI 咨询商务智能

结合信息物理系统，物联网的典型应用领域如下（见 4.5 节）：

- 自动化；
- 智慧城市；
- 智能电网；
- 智能医疗；
- 智能照明；
- 其他。

在当今的物联网系统中，许多物体或对象将会以不同形式成为网络的一部分。信息和通信系统将会以不可见的形式嵌入到环境中去，这是 RFID 和无线传感器网络（Wireless Sensor Network, WSN）技术将会面临的新课题。RFID 技术允许读取设备（也称作主动式应答器（transponder））与被动式识别标签（或称被动式应答器）之间进行非接触式通信，这种通信产生的数据能够存储、处理并且能无缝高效地表示成易于解释的形式。因此，物联网服务能够像日常用品一样使用，很大程度上是因为 RFID 技术的成功。RFID 技术现今已广泛用于对物体、人或动物的追踪。RFID 系统架构可以分为简单的 RFID 标签和无线网络化的 RFID 读写器两个部分。这种架构以一种明确界定范围的方式支持对物理事物的追踪，但也限制了在更具挑战性的场景下所需要的感知能力和部署灵活性。这种物联网架构模型是由配有可以唯一标识身份及相关信息的 RFID 标签的物理对象所组成的，具备感知、计算和网络通信能力的自组织和去中心化的系统。



过去 10 年间，互联网上关于“物联网”“无线传感器网络”和“泛在计算”等关键词的搜索趋势如图 4.2 所示（Gubbi et al. 2013）。

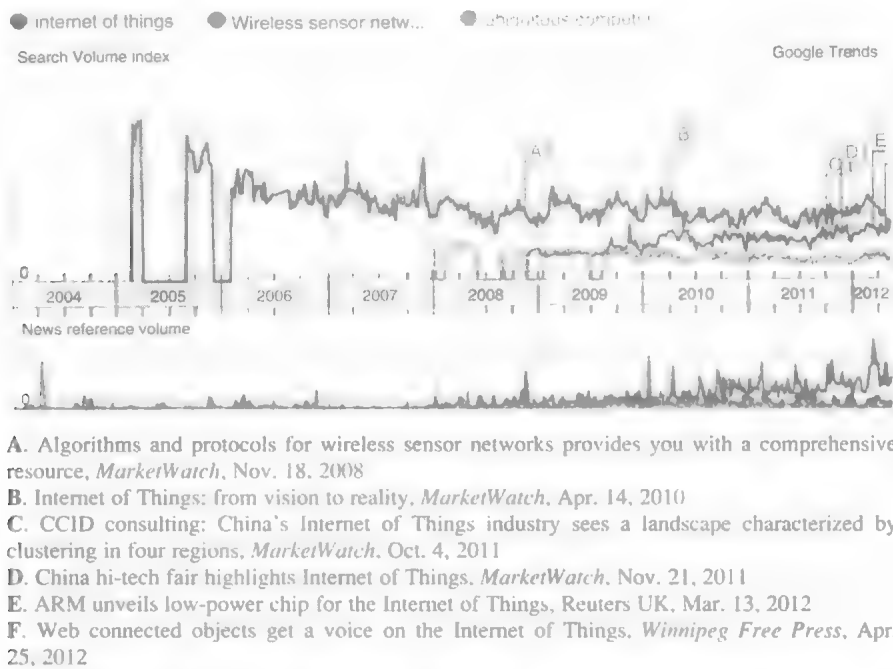


图 4.2 自 2004 年以来的 Google 搜索趋势：物联网、无线传感器网络和泛在计算（Gubbi et al. 2013）

4.2 射频识别技术

从历史的角度来看，RFID 技术的使用可以追溯到 20 世纪 40 年代的第二次世界大战期间。当时的英国空军使用类似于 RFID 的技术来分辨空中的友机和敌机。RFID 的最初概念出现在 1948 年由无线电工程师协会出版的题为《Communication by Means of Reflected Power》的学术会议论文中（Stockmann 1948）。1973 年 1 月 23 日，M. W. Cardullo 获得了第一份关于可重写主动式 RFID 应答器的美国专利。RFID 应答器是封装好的带有天线的微型集成电路芯片，能够应用到各种物体上。如果应答器自带电源进行供电，则称之为主动式的或有源的。同样在 1973 年，C. Walton 获得了被动式应答器的专利，这种应答器让门不需要钥匙就可以打开。钥匙被一张卡片所取代，卡片中的嵌入式应答器可以与门旁的读写器进行通信，当读写器检测到 RFID 标签中的有效身份识别码时，读写器就打开门。当应答器没有自带电源，并且无法主动发送信号时，则称之为被动式的或无源的。美国政府也同样使用 RFID 系统，20 世纪 70 年代，一群科学家在 Los Alamos 国家实验室提出一个想法，可以把应答器放置到汽车上，把读写器放置到进入安全设施区域的大门中，大门的读写器天线会唤醒汽车上的应答器，应答器能够将 ID 或者其他数据（比如司机的 ID）发送给读写器。20 世纪 80 年代中期，一部分最初工作在该国家实验室的科学家离职，并创建了自己的公司，研发出自动收费支付系统，这项技术从此走上商业化道路。这项技术也被广泛使用在全世界的道路、桥梁和隧道中（Roberti 2005）。

RFID 技术可以提升工作效率，并且能够使按需分配的后勤保障更加透明。RFID 系统包含许多微电子设备（称为应答器）和读写单元。应答器就是现在人们常说的标签。标签被贴在物体上，使物体能够被识别。它们有各种各样的形式和功能特性，大致可以分为主动式标签和

被动式标签两类：

- 被动式标签：读/写作用距离一般小于主动式标签，没有内置电源提供能量来发送信号；
- 主动式标签：读/写作用距离一般大于被动式标签，使用内置电源供电来发送信号

被动式标签（如图 4.3 所示）的价格一般相对较低廉。它们的成本从 20 美分到几美元不等。因为它们自身并不带有电源，标签从读写器发出的信号中获得能量，其天线通过电磁捕获或电感耦合产生电流，产生的能量可供标签中的芯片工作和发送信号。这些标签本质上是通过反射读写器的无线电波来发送信号，这种现象也称为后向散射。然而，它们的作用距离非常小，通常不到 10 英尺<sup>①</sup>。半主动式标签则介于两者之间，其使用电池为标签芯片供电，而从读写器获取能量来发送信号（Cisco 2008）

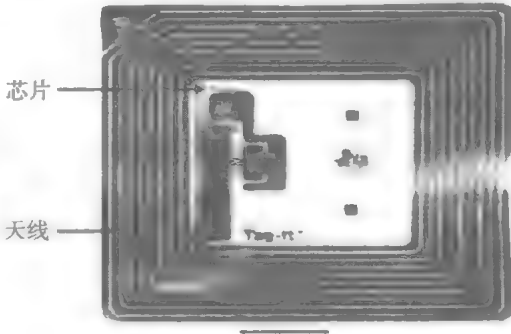


图 4.3 被动式标签（Cisco 2008）

146

低成本的标签适用于食品行业，成本在 20 美分到 35 美分之间，最新型的标签成本将会降到 5 美分（Kärkkäinen 2003）。然而标签的成本会受许多因素的影响，例如：

- 数据容量；
- 形状；
- 工作频率；
- 传输范围；
- 性能要求；
- 是否有微芯片处理器；
- 读/写内存。

根据如何发送信号给 RFID 读写器和如何通过电磁感应从读写器获取能量，被动式标签可分为不同种类，一般根据以下两种方法来区分：

- 近场负载调制和电感耦合（如图 4.4 所示） RFID 读写器提供短距离交流磁场，被动式标签可以通过磁场产生感应电流进行供电和广播信息。通过电磁耦合，磁场（近场）会在 RFID 标签天线中产生电压，这样就可以为标签进行供电，标签就可以向读写器发送信息。当标签从读写器产生的磁场中获取能量时，RFID 读写器将会通过其天线感应到相应的压降，这样，标签通过切换负载电阻开关进行负载调制，就可以将二进制信息发送给读写器。当标签进行负载调制时，读写器的天线会感应到信号压的振幅变化。使用负载调制和电感耦合的无源 RFID 标签工作频率为 125 ~ 135kHz 和 13.56MHz。使用低频也带来许多局限性，比如需要更大的天线、数据传输速率和带宽都较低，还要面对电磁场强度衰减  $1/r^6$  的问题（ $r$  代表低频读写器与被动式 RFID 标签之间的距离）（Cisco 2008）。
- 远场后向散射调制和电磁耦合（如图 4.5 所示） RFID 读写器提供中等距离电磁场，被动式标签可以通过磁场产生感应电流进行供电和广播信息。通过电磁耦合（远场），被动式 RFID 标签可以在读写器电磁场中获得能量。然而，电磁场中的一部分能量由被动式标签天线反射到 RFID 读写器。反射的精确特征取决于接入天线的负载。标签可以

147

① 1 英尺 = 0.3048 米。——编辑注

改变负载的大小,对反射的电磁波进行振幅调制,从而通过后向散射调制将有效信息载荷发送回 RFID 读写器。使用后向散射调制和电磁耦合的标签一般要比电感耦合方式的标签传输距离更远。被动式 RFID 标签工作在 868MHz 或更高的频率。由于电磁远场的特征,这种远场耦合的标签接收到的信号衰减相对较慢,这种标签的天线也一般要比使用电感耦合的标签更小 (Cisco 2008)。

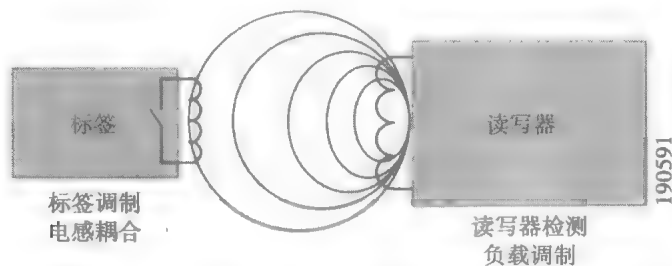


图 4.4 被动式标签负载调制 (Cisco 2008)

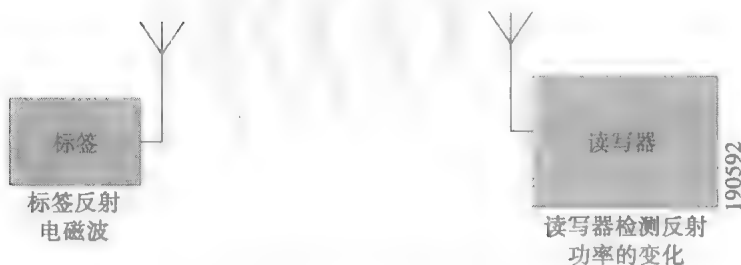


图 4.5 被动式标签反向散射调制 (Cisco 2008)

RFID 读写器的价格取决于其类型,RFID 读写器通过电磁波与 RFID 标签进行无线通信,然后发送信号给用户进一步处理。

大多数标签对环境温度和其他外界因素都有一定的耐受性,在被更换之前能够连续读写至少 300 000 次。因此当用到可循环使用的集装箱中时,这种标签也能够重复使用 (Kärkkäinen 2003)。

主动式标签通常应用在闭环系统中对高价值资产的实时追踪中,这也使得主动式标签的成本更高。主动式标签通常要比被动式标签更大,它们内置了内存,这样就可以记录资产的各种信息。这种存储器也使得主动式 RFID 标签优于被动式 RFID 标签。主动式标签的工作频率有 303MHz、315MHz、418MHz、433MHz、868MHz、915MHz 和 2400MHz,读写范围为 60~300 英尺。主动式 RFID 标签因为具有较高的发射功率、优化的天线和可靠的板载电源,一般有更高的读取速率和读取可靠性。根据内存数量、电池寿命和是否有额外的板载温度传感器、运动传感器、遥测接口等,主动式 RFID 标签的成本会有很大的差异。更加坚固或定制的标签外壳也会相应提升标签的成本。与大多数电子元器件一样,主动式标签的市场定价会随着技术进步、生产率以及商品化程度的提高而逐渐降低 (Cisco 2008)。

表 4.2 提供了高频及低频标签相应特征参数的近似值。测量值会受多种因素影响,如标签类型 (主动或被动)、环境中无线电噪声和无线电吸收材料的存在、天线的大小和功率增益以

及读写器的类型等。

表 4.2 主动式标签和被动式标签的特征 (Zaheeruddin and Mandviwalla 2005)

标签频率	标签类型	范围	传输速率	电能功耗
低频	被动式	< 1.0m	1 ~ 2kb/s	20μW
高频		1.5m	10 ~ 20kb/s	200μW
超高频		10 ~ 30m 20 ~ 100m <sup>1</sup>	40 ~ 120kb/s	0.25 ~ 1.0W

①代表使用电源来驱动标签。

一般的，可以对工作在不同频率的标签的特征进行如下评估（见表 4.3）

表 4.3 高频和低频标签的对比 (Zaheeruddin and Mandviwalla 2005)

标签频率	相对范围	传输速率	电能功耗	相对成本	环境敏感度
低	短	低	低	低	低
高	长	高	高	高	高

RFID 标签可以制成各种各样的形式，例如玻璃胶囊状、盘状、圆柱形、楔形、卡片状、钥匙链形状等，小的仅有几平方毫米，大的能有数英尺长。不同的形状、大小适用于不同的应用。由于玻璃不发生化学反应和非生物降解的特性，长为 2mm 到 1cm 的玻璃胶囊形状的标签能够通过大的皮下注射针头直接注射到家畜的皮下。

同样，不同工作频率的 RFID 标签也用于不同的目的，没有一种理想的工作频率适用于所有的应用。比如，高频更适合于需要远距离通信的航运业，而低频更适合于近距离的访问控制。

RFID 系统的组件包括：

- 用来标识物体的 RFID 标签；
- 能够访问标签并接收标签信息的 RFID 标签读写器；
- 相关的软件（RFID 中间件），通过企业应用系统来控制 RFID 设备，管理数据和接口。

RFID 读写器能够接收存储在标签中的身份信息，一个 RFID 系统可以包含多个读写器和标签。读写器不仅可以读取每个标签的身份标识，还可以将信息存储到标签中以及改变标签的状态。读写器读取到的信息只有连接到网络服务器时才真正有用。因此，RFID 系统还需要两个其他组件，分别是服务器和网络。RFID 读写器是个集成的设备，它集成了以下几个部分：

- 放大器；
- 载波；
- 解调器模块；
- 调制器模块；
- 网络接口；
- 接收天线；
- 发送天线。

RFID 系统软件（中间件）可以使读写器和标签工作在多种频段上，并使用现有协议使应用程序可以通过读写器访问标签。总的来说，中间件包含了以下三个组成部分（Harish 2010）

- 设备接口：在核心处理接口和 RFID 硬件之间建立连接，使得 RFID 系统可以发现、管理并控制读写器和标签；
- 核心处理接口：是一个管理决策组件，用于在发送数据给应用程序接口前管理和操作

大量原始 RFID 数据；

- 应用程序接口：负责与特定应用程序交换 RFID 数据。

如今，RFID 的应用领域越来越广，这些领域包括：

- 访问控制；
- 行李分拣；
- 欺诈预防；
- 库存管理；
- 快件跟踪；
- 其他。

根据部署 RFID 的主要目的，可以将这些应用做如下分类。

- 身份认证：如非接触式智能卡，具有小额现金自动支付功能，通常是由人来携带而不是物体；
- 数据自动采集：应用在供应链应用中，如能够自动追踪产品、包装箱和货盘，获取的数据用于企业应用程序，例如，供应链管理系统、客户关系管理系统和企业资源规划系统；
- 识别：RFID 与传感器结合作为主要的识别平台；
- 位置跟踪：在开放环境中对人或物的位置进行定位。

### 4.3 无线传感器网络技术

智能传感器不仅能监测操作过程和周围环境，还能处理检测到的数据、传输获得的结果，可以对某个特定区域的一个复杂系统进行监测和控制，也可以担负早期预警系统的作用。举一个典型应用案例，安装在可再生能源系统中风力涡轮机上的智能震动传感器，当传感器检测到风力发电塔的振幅达到危险的水平时，就会关闭系统。通过使用无线通信技术，智能传感器可以连接到传感器网络，例如监控可再生能源系统中的风力涡轮机。将无线互联的传感器部署在复杂环境中有很大优势，因为可以避免有线的连接。

随着微电子元件的发展和相关智能功能逐步小型化，无线传感器可以分散地部署到需要监控的地方。无线传感器节点通常使用嵌入式计算系统来实现（见第 2 章）。嵌入式计算系统已经应用到了日常生活和工业生产的许多方面。在这种情境下，最重要的是与外部的最近网络进行通信。随着网络化传感器也就是所谓的无线传感器网络的发展，智能传感器节点可以通过无线通信连接到计算机网络，无线传感器网络的应用范围也从最初的生产控制预警系统延伸到未来的智能尘埃。

智能尘埃属于泛在计算模型（Marc Weiser 1991）的三种设备形式之一，它也被认为是最有用的泛在设备（Poslad 2009）。智能尘埃是由大量的微机电系统（MEMS）组成的，这些微机电系统的大小从毫米级到微米级再到纳米级。传感器可以检测物理量或化学量，并且能够集成到智能衣服中（将传感器、执行器、计算机、电源等集成到衣物中，作为交互式通信网络的一部分）。智能尘埃通常可以通过计算机网络进行无线操控，并且可以部署到特定区域来执行任务，例如使用 RFID 技术去感知智能尘埃组件。微型智能尘埃通信设备天线的大小从几毫米到几厘米不等，但它可能在电磁和微波环境下损坏。

#### 4.3.1 传感器技术

传感器能够产生与测量物理量相对应的电信号（通常为电压），电压通常与测量值成正比，其值可以描述为：

$$V_{\text{sensor}} = K \cdot m$$

其中  $V_{\text{sensor}}$  是传感器产生的电压,  $K$  是传感器的灵敏度常数,  $m$  为被测量。传感器的灵敏度表示当测量的输入量改变时, 传感器的输出发生的变化, 假设其具备线性特征, 值为斜率  $\Delta y / \Delta x$ 。

152

传感器可用于仪器仪表和环境监控, 在时间和空间范围内追踪资产, 检测环境发生的重要变化, 并能够在确定的变化范围内控制附近的系统, 调整服务策略以改进其效用。传感器也应用在日常生活中, 例如, 触控式电梯按钮、触碰底座会变暗或变亮的灯等。得益于机电一体化和易用的微控制器平台的发展, 传感器的使用已经超出了传统的对流量、压力和温度的测量。模拟传感器 (例如, 电位器和压敏传感器) 仍然被广泛使用, 应用的领域包括制造业、机械、航空、汽车、医疗和机器人。

传感器需要减小对被测物理量的影响, 这就需要减小传感器的体积以减少测量误差。随着新技术的出现, 传感器可以在微观尺度下进行制造, 例如, 使用到 MEMS 技术的微型传感器, 其大小从纳米到微米再到厘米不等, 并且可被组装到分离的器件和大型阵列中 (Berlin and Gabriel 1997)。MEMS 承担两种不同的功能: 作为传感器和作为执行器。传感器和执行器都作为转换器, 将一种信号转换为另一种信号。转换器可以将环境信息转化为数字信号, 反之亦然。MEMS 传感器可以将环境信息 (例如温度、湿度、压力) 转化为电信号。MEMS 执行器的工作恰恰相反, 它将电信号转换为物理行为来移动和控制设备, 例如电机、液压活塞和继电器。这些 MEMS 组件有很高的谐振频率, 使其具备很高的操作频率 (Poslad 2009)。

数百万协同工作的感知、驱动执行机构能够组成一种可编程事物形式, 因为它们能够自组装成任意的三维形状 (Goldstein et al. 2005), 作为更流畅灵活的计算机和人机接口的基础 (Poslad 2009)。

MEMS 的设计不同于同等规模的那些将电子元器件机械地分散置于硅基集成电路上的设备, 其包含了许多层添加到基片上的参杂硅。

MEMS 传感器集成了必要的感知、通信和计算硬件, 连同电源一起封装起来, 体积不超过一立方毫米, 依靠其感知和通信能力实现特定的工作性能 (Kahn et al. 2000)。这些毫米级的节点与微尘的大小相当, 称为智能尘埃。

MEMS 执行器的设计不同于同等微观尺度的设备, 其通常使用集成电路设计和纳米技术。

153

4.3.2 传感器网络

传感器网络通常包含大量传感器节点。一个传感器节点可以是一个大传感器网络的一部分, 网络中的每个节点都具备处理和收集传感器信息、与网络中其他互联节点进行通信的能力。

传感器节点的主要部件有微控制器、收发器、外部存储器、电源以及一个或多个传感器。其典型架构如图 4.6 所示。

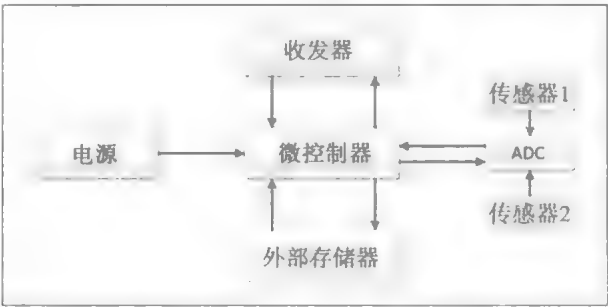


图 4.6 传感器节点体系架构

传感器节点的微控制器（见图4.6）用来执行特定的任务、处理数据并控制传感器节点的其他组件。由于其低廉的价格、与其他设备互联的灵活性、易编程和低功耗等优点，控制器被广泛地使用。

对于无线通信，传感器节点一般使用工业、科学和医学（ISM）无线电频段，此频段允许广播和频谱分配，并且全球可用。近些年来短距离、低功耗的通信系统对ISM波段的使用需求快速增长，例如，蓝牙设备、近场通信（NFC）设备、传感器网络和无线计算机网络，它们都使用ISM的低功耗通信频段。

传感器节点中的收发器是将发射器单元和接收器单元组合到一个设备中。发射器的操作状态有发送、接收、空闲和休眠。将其具体实现作为状态机，这些状态机会自动执行一些操作。状态机是一种用于计算机编程和时序逻辑电路设计的数学计算模型，根据一组输入做出反应，并计算出一组输出。有限状态机具备有限个状态来表征其处理状态，其反应取决于内部状态，任何输入都要遵循特定的语法。

传感器节点存储器的需求取决于应用，节点通常使用两种存储器：用户存储器用于存储应用相关数据和个人数据；程序存储器用于存储设备指令。程序存储器还可以存储设备的身份识别数据。

无线传感器节点发展的一个重要问题是确保系统拥有足够的电能，因为传感器节点需要通电才能进行感知、通信和数据处理。用于数据通信的能量要大于其他处理过程。例如，将1Kb的信息发送100m所需的能量大致等同于使用每秒可处理1亿条指令的处理器执行300万条指令所需的能量（http1 2015）。电能可以存储在电池和电容中，电池是传感器节点的主要电源来源。无线传感器节点通常是小型电子设备，它们仅可装备规格为0.5~2Ah、1.2~3.7V的电源（http1 2015）。

使用多跳技术可以提高传感器网络的能源效率（Zhao and Guibas 2004）。在一个 $N$ 跳网络中，整体的传输距离为 $Nd$ ， $d$ 代表每一跳的平均距离。最小接收能量为 $P_r$ ，发送节点的所需能量为 $P_t$ 。在同等距离发送数据时，多跳传输相对于单跳传输的能量优势 $P_A$ 可以描述为（Poslad 2009）：

$$P_A = \frac{P_t Nd}{NP_t Nd} = \frac{(Nd)^2 P_r}{(Nd^2 P_r)} = N^{(n-1)}$$

传感器硬件设备按大小可从纳米传感器到大尺寸传感器。它们扮演着数据产生器、监测数据预处理器或后处理器的角色。对RFID传感器来说，数据处理的复杂程度要低于其他传感器类型。传感器不断产生的模拟信号量 $x$ 通过模数转换器（ADC）转化为等比例的数字信号量，并交由微处理器做进一步的处理。传感器的传统分类如下。

- 被动式传感器：自身供电，不需要通过主动探测来操控环境；
- 全向型传感器：在测量中无感知方向概念；
- 方向型传感器：在测量中有感知方向概念；
- 主动式传感器：需要电源不断地提供能量，通过主动感知环境来获取数据。

传感器节点可用于：

- 空中交通管制；
- 战场侦察；
- 环境监测；
- 工业自动化；
- 地雷探测机器人；

- 目标跟踪；
- 火灾探测；
- 其他。

传感器和感知节点在潜在的民用、工业、医疗和军事领域应用中也发挥着许多作用。在医疗应用领域，传感器节点被部署用以：

- 帮助残疾患者；
- 监护残疾患者；
- 监护流动患者；
- 跟踪伤残患者；
- 其他。

传感器节点在其他领域也扮演着重要作用，例如：

- 控制系统；
- 数据采集（SCADA）系统；
- 监控系统；
- 其他。

传感器还可以部署到应急响应系统中，以应对危机和突发事件（Mehrotra et al. 2004）。

对模拟量进行数字化记录需要模数转换器（ADC），ADC 的任务是将模拟输入量  $x$  转换为等比例的输出值。许多情况下，需要对时变信号数字化，输入量必须在特定时间采样并保持，这项工作可由采样保持电路（S+H）完成。通常，非电子信号需要进行数字化，在进行模数转换之前，需要将非电气值转换为一个电压值。

用来探测非电气信号的传感器，根据非电气值输入映射到相应的输出电压值。图 4.7 为模拟量转化为数字量的转换系统结构图，模数转换非常高效的原因如下：

- 多通道输入，由模拟多路复用器控制切换通道；
- 在到达稳定时间后，取样保持电路会切换到保持状态，可以对稳定的模拟信号进行转换；
- 在转换开始（SOC）模式下启动模数转换；
- 在完成转换后，模数转换器激活终止转换（EOC）模式；
- ADC 控制器将转换的数字量交给后续的数据处理单元（图 4.7 并没有展示）。

156

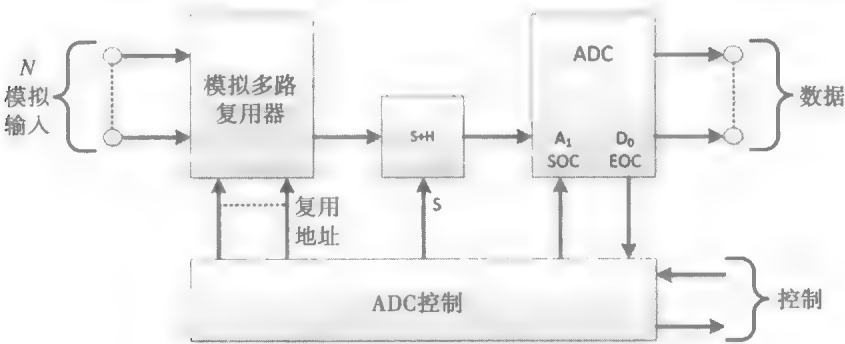


图 4.7 模数转换系统模块

模数转换器共同的传输特征曲线如图 4.8 所示，相关参数如下：

- 连续的横坐标轴  $y$ ；



157

- 离散的纵坐标轴  $a$ 。

变量  $Y$  的区间间隔可以对应相应的二进制数  $a$ ，对于一个  $n$  位二进制数  $N=2^n$ ，间隔是可区分的。如图 4.8 所示，横坐标值  $0, Y, 2Y, \dots, iY, \dots, (N+1)Y$  均匀分布在横坐标轴上。因此，输入的电压值会与转化的二进制数值保持一致。

模数转换器的转换过程需要多个时钟周期，在转换时间周期输入信号  $U_m$  必须保持不变，这是由上游 S+H 电路实现的。为了实现这一目的，需要转换器的控制逻辑产生保持信号，正是由控制逻辑来决定是否将输入信号  $U_m$  保持不变，还是跟随模拟输入信号  $U_m$  进行变化。S+H 电路中运算放大器连接电压输出和一个具有低漏电流的电容（见图 4.9）。

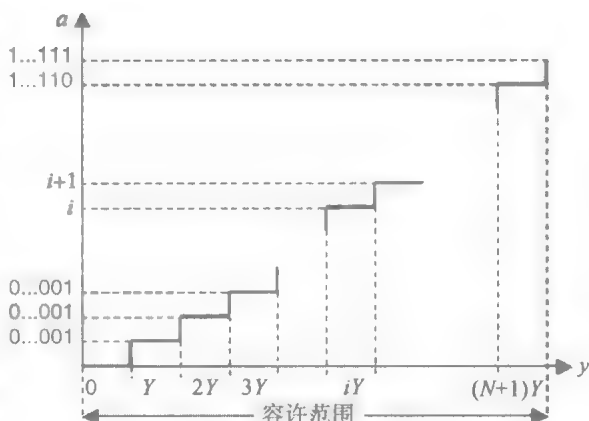


图 4.8 模数转换分辨率特征

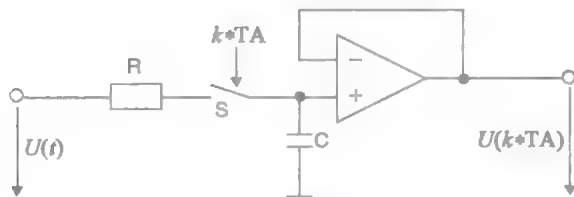


图 4.9 模数转换器的采样保持电路

### 4.3.3 无线传感器网络

无线传感器网络由空间散布的自治传感器节点组成，这些节点监控物理空间/环境的状态，并协同地把测量数据通过网络发送到一个汇聚位置。现代无线传感器网络是双向的，意味着可以通过网络控制传感器节点。因此无线传感器网络也作为泛在通信网络，无论何时何地都可根据物联网范式远程访问相关信息和调用相关任务。无线传感器网络可用于工业和消费者应用中，例如工业工序监控、机器状态监控等。在应用多元化的背景下，需要将不同的网络功能和服务进行组合，根据网络架构、网络覆盖范围、频率使用范围、带宽、功耗的不同，可以衍生出多种不同的无线传感器网络。尽管传感器应用的目标各不相同，但无线传感器节点的主要任务都是要从目标区域感知和收集数据、处理数据并将其传回到应用程序。而想要高效地完成此任务，需要使用高效的路由协议建立传感器节点和数据接收器之间的最小能耗路径。

158

无线传感器网络的规模从几个节点到成千上万个节点不等，每个节点可以与一个或多个节点互联。每个这样的传感器网络节点一般都具有多个组成部分（如图 4.6 所示）。无线传感器网络的拓扑结构从简单的适用于监控和安全应用的星形拓扑，到先进的多跳无线网状网络，这种网状网络可以通过路由或洪泛来传播信息（Dargie and Poellabauer 2010; Sohraby et al. 2007）。

根据文献（Sohraby et al. 2007）所描述的，无线传感器网络的路由协议设计需要考虑很多问题，例如网络节点的能源和资源限制、无线信道通信质量具有时变性以及丢包和延迟等。许多无线传感器网络路由策略可以解决这些问题。

- 平面网络结构：有许多优势，例如，在维持自身结构上具有最小开销，具备发现多条通信路径的能力，具备容错性。

- 网状结构：具备高能效、高稳定性和可扩展性。网络节点按簇进行组织，其中存在一个节点需要具备更多的剩余能量。例如，定义簇头，簇头要负责簇内所有节点的协同工作及簇之间的转发信息。建簇可有效减少能量消耗，并延长网络生存时间。
- 以数据为中心的方法：在网络中传播兴趣，此方法使用基于属性的命名方式，源节点查询属性而不是一个感知节点。兴趣扩散通过分发任务给传感器节点以及对相关具体属性查询来实现。有不同的策略用于在传感器节点之间传播兴趣，包括广播、基于属性的多播、地域群播和任播。
- 基于定位的方法：基于位置的路由策略在源节点的查询与网络中其他节点位置相关时非常有用。这种查询会指定一个感兴趣的现象可能发生的区域，或者网络环境中一个特定点附近的区域。

在参考文献 (Sohraby et al. 2007) 中，描述了许多关于在无线传感器网络中传播数据的路由算法，这些路由算法的性能和设计仍在讨论中。

一般来说，路由算法基于多种网络分析和图论概念以及运筹学进行研究，包括最短路径、最大流问题和最小跨度问题。路由问题与反馈控制理论中的动态规划和最优控制问题密切相关。

最短路径方案能够找到已知节点到目标节点的最短路径。不考虑链路长度，如果成本与每条链路相关，那么这些算法还可以计算最小成本路径。算法可以是集中式的（找到从给定节点到其他所有节点的最短路径），亦或是分布式的（找到所有节点到指定节点的最短路径），下面列出一些最短路径算法。

- Dijkstra 算法：具有多项式复杂度；
- Bellman-Ford 算法：能够找到具有最小跳数的路径。

基于竞争博弈论的路由算法也在不断发展 (Lewis 2004)

大规模通信网络包含节点环（环状路径）。此外，每个节点都是一个共享资源，可以处理从不同路径传来的多重信息。因此，通信网络易受死锁的影响。死锁状态就是所有在一个环状路径下通信的节点缓冲区都满并不断等待其他节点释放缓冲区。这样的话，没有节点可以发送数据，因为没有节点具备额外缓冲区，所以，整个环路的通信就被阻塞了。

活锁是指消息在网络中不断地循环，永远不会到达目的地。活锁是一些路由算法的缺陷，因为这些路由算法在预定链路阻塞时，没有考虑选取离目的地最近的替代链路。

许多路由算法都具有死锁避免和活锁避免 (Lewis 2004) 的机制。洪泛是一种常用的在线或无线 ad hoc 网络中进行路径发现和信息传播的通用方法 (Sohraby et al. 2007)。这种路由策略简单且不依赖于网络拓扑的保持和复杂的路由发现算法。洪泛使用被动的策略，每一个节点接收到数据或控制数据包时，将数据包转发给它的所有邻居节点。每个数据包都会沿着所有可能的路径传播，只要网络是互联的，所有数据包最终都会到达目的地。此外，随着网络拓扑的变化，数据包会沿着新的路径传播，图 4.10 描述了数据通信网络中的洪泛概念。如图 4.10 所示，最简单形式的洪泛可能造成数据包在网络节点中无限复制。

为了防止数据包在网络中无限循环，数据包通

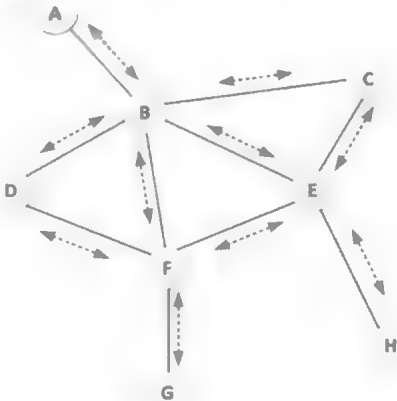


图 4.10 数据通信网络模型中的洪泛传输

常具有跳数计数器。起初，跳数计数器用来估计网络的范围，当数据包在网络中发送时，每次向下一跳发送数据后，跳数计数器就会递减。当跳数计数器为零时，数据包就会被丢弃。使用生存时间也可以达到相应的效果，生存时间记录此数据包可以在网络中存活的时间。当生存时间到时，数据包不再转发。可以进一步改进洪泛策略，让每个节点可以识别数据包的唯一性，当接收到已发送过的数据包时直接丢弃。然而，这样的策略需要维持一个发送历史记录以记录已经发送过的数据包。

无线传感器网络的应用领域非常广泛，如前所述，例如

- 智能道路监控：使所有车辆之间相互感知，可以帮助避免
  - 交通事故；
  - 交通拥堵；
  - 在校园和医院的超速。
- 体育赛事监控：
  - 监控跑者的体征参数；
  - 监控终点线；
  - 追踪足球赛中的足球。
- 废弃物管理监控：通过废料堆内的温度以及化学反应等，监控其分解过程，以防止其到达危险的临界水平。

更普遍的监控应用包括（Yick et al. 2008）：

- 室内/室外环境监测；
- 健康状态监测；
- 电力监控；
- 仓库库位监测；
- 工厂和生产过程自动化监测；
- 地震及结构性事件监测。

在无线传感器网络跟踪应用中，监控跟踪对象还包括：

- 动物；
- 人类；
- 物体；
- 车辆。

## 4.4 电力线通信

电力线通信（PowerLine Communication, PLC）技术使用中低压电力网络提供不同的电信服务，包括因特网接入的家庭自动化（通常称为电力线宽带（BPL））、工业建筑自动化、通过机场照明进行数据通信以避免跑道入侵（Schonefeld and Moeller 2012），以及使用户可以在任何地方使用应用程序的泛在网络化系统。

电力线通信技术可以使用在高比特率应用和低比特率应用中。表 4.4 和表 4.5 分别展示了低比特率及高比特率的技术、主要特征以及技术规范（Chaouchi 2010）。

表 4.6 中展示了一些 PLC 技术（HomePlug、UPA 和 CEPCA）。新兴的全球标准化设备市场推动了这些技术的开发。它们都是不可互操作的，这就显示出建立一个 PLC 市场国际标准的重要性（Chaouchi 2010）。

通过电介质发送 PLC 信号的主要技术是将低幅调制信号添加到低压电信号上（大约为载

波频率的中值) (Moeller and Vakilzadian 2014a)。

表 4.4 低比特率技术、特征和规范

PLC 类型	技术	特征	技术规范
低比特率	X10	家庭自动化电子设备间的通信协议; 家居环境中使用广泛	吞吐量 < 1Kbit/s
	HomePlug CC	高级命令和控制技术的规范; 是实现家居环境便捷、安全、私密的基础	吞吐量 < 50Kbit/s 室内或室外 特定的 MAC 层
	Echelon	软件控制收集和分配使用通信卫星传送的民用通信流量	吞吐量 < 10Kbit/s 家居环境通用

162

表 4.5 高比特率技术、特征和规范

PLC 类型	技术	特征	技术规范
高比特率	HomePlug AV	设备互相通信和通过现有家庭电线组网的标准; 为高清电视 (HDTV) 和 IP 电话 (VoIP) 应用业务提供充足的带宽	吞吐量 200Mbit/s 最大 TCP 吞吐量 60Mbit/s 户外使用
	UPA	通用电力线协会芯片组, 支持家庭流媒体传输, 如 HD 视频内容、音频文件、图像文件等。	吞吐量 200Mbits/s 最大 TCP 吞吐量 60Mbit/s 户外使用
	CEPCA	消费级电力线通信联盟; 推动更先进的高速 PLC 通过快速、广泛以及开放的行业应用实现新一代消费级电子产品。	吞吐量 220Mbit/s 最大 TCP 吞吐量 70Mbit/s 室内使用 (日本)

表 4.6 用于室内环境的 PLC 技术和标准

技术/标准	行业协会	技术
HomePlug	HomePlug 协会 (USA); 领导者: Intellon	HomePlug 1.0, Turbo (吞吐量 14 ~ 85M) HomePlug AV (吞吐量 200M)
		技术: OFDM, CSMA/CA
UPA	UPA 协会 (EU)	UPA (吞吐量 45M)
	领导者: DS2	UPAHD (吞吐量 200M)
		技术: OFDM, CSMA/CA
CEPCA	CEPCA 协会 (日本)	HD - PLC (吞吐量 220M)
	领导者: Panasonic	技术: wavelets, TDMA
IEEE	IEEE P1901 WG	基于 HomePlug AV 的标准草案

在 20 世纪 90 年代末, 能源和电信市场放松管制以及 PLC 技术的可用都促进了这一概念发展。为了在每条 PLC 链路上提供最佳的速度, HomePlug 技术 (一个由业界领袖共同商定从技术到服务和内容的协议) 成功应用到了超过 195 种产品中。HomePlug 定义的产品提供在子波段的多种调制模式。通用电力线协会 (UPA) 已经推出了高速电力线网络标准 (数字家庭标准 (DHS)), 并且提供 MB 级高速率调制解调器。PLC 应用标准有 IEEE P1901, 应用于使用电力线通信的高速通信设备 (物理层传输速率超过 500Mbit/s), 也称作宽带电力线 (BPL); IEEE P1775, 应用于 PLC 设备和电磁兼容性测试方法中。电力线通信使得私人用户和公共用户不需要借助额外的其他设施就可以进行通信。

163

电气公司使用 PLC 进行低速率数据传输 ( $< 50\text{ kbit/s}$ )，在  $3 \sim 148\text{ kHz}$  频带发送信号用来控制一些家庭自动化产品，比如智能电表。这种控制特征使得 PLC 在工业应用领域中能够使一个由散布于广大区域的大量组件构成的系统具备感知、控制和自动化功能，例如，在自动化和生产制造系统中，用来作为连接大量设备的通用通信网的大规模控制 (Bumiller et al. 2010)，以及智能电网、智能城市、智能建筑和智能交通中的能源控制网络技术。这些例子都说明不需要额外的电力线给设备供电（例如，建筑中的智能仪表）就能与社区的数据汇集器通信。另一方面，电力线通信可以通过电源线连接到数据汇集器。基于这些原因，全世界大多数智能电网项目都选用了 PLC，大多数城市的智能路灯项目都选用了泛在计算和 PLC (Echelon 2015)。

PLC 网络需要考虑的另一个方面是网络中经常会发生的变化。例如，中压能源系统的变化会影响网络传输功能，物理拆除，以及网络升级修复。这样的话，网络拓扑和信号传输状态的变化会影响通信。但 PLC 网络有能力消除这些变化，使得 PLC 不同于其他类型的网络。

#### 4.4.1 物联网和电力线通信

物联网服务的形成是基于人与人、人与物和其他类型的交互需求，例如物与人、人与机器、物体与物体、机器与机器，这些需求也是基于泛在计算和普适计算的。这样的系统可以利用 RFID 技术。另外，物联网的新服务（现实与虚拟世界的结合）用到了 RFID 和其他一些技术，例如传感器技术、移动通信、智能计量技术等 (Moeller and Vakildadian 2014b)。

物联网和 PLC 技术对家庭网络应用来说非常重要，家庭网络应用是为了建立一个物与物、人与物以及人与家中所有物体互联的智能家居环境，这个概念在物联网和 RFID 流行之前就出现了。在物联网的范例中，家庭网络服务已经发展成为物联网服务的一部分，它不存在 RFID 和传感器这些具有有限资源并且主要依靠电池供电的微型设备的连接问题 (Chaouchi 2010)。

对于智能城市，PLC 和物联网能够减少全世界的能源消耗。大约三分之二的世界能源和 60% 的水资源是由城市消耗掉的，城市也产生了 70% 的温室气体。如今人们对气候变化的担忧推动着基础设施建设向更加节能的方向发展。随着技术的不断创新，我们的城市也变得更加环境友好，与此同时，我们的生活质量不断提高，生活成本不断降低。除了交通，建筑的能源消耗也很巨大，它们占据了 40% 的能源消耗，并产生了 21% 的温室气体 ( $\text{CO}_2$ )。使用节能高效的新技术可以在不损失住宅舒适度的情况下，减少能源消耗和  $\text{CO}_2$  的排放。智能环境的概念需要基于 IoT 和 PLC 的研究，目的是创建智能城市、智能家居、智能建筑和智能交通。

智能环保建筑需要创新的解决方案来构建可利用普适计算、IoT 和 PLC 的基础设施，这些基础设施包括：

- 访问控制系统；
- 建筑自动化；
- 电子装置；
- 消防和疏散；
- 供暖、通风及空气调节；
- 身份识别系统；
- 入侵检测及视频监控；
- 供水及用水设施。

使用 IoT 和 PLC 并结合传感器和 RFID 技术用于消防和人员疏散，可以使消防人员很容易地判别谁还在建筑物中，并高效地开展救援工作。利用电子装置技术，可以使用发光二极管 (LED) 替代节能路灯，这样可以减少成吨的  $\text{CO}_2$  排放，并节省数千美元的电费。当房间没人

时，灯光会自动关闭。除此之外，当房主离开屋子时，房间温度会降低，并且在房主回来之前，温度会自动提升到舒适的水平。家居系统可以在家外面进行控制，例如，判断窗户是否已关闭，咖啡机是否已关闭。能源供应商可以按日、周、月或者应用地域来读取用户的能源消耗。因此通过使用 IoT 和 PLC 的智能设备，对建筑物和家居环境的操控将会更简单、更安全、更加环境友好并且价钱更划算。

这些智能硬件可以通过互联的传感器和执行器收集数据，并且能够响应实时请求。因此，拥有可靠的通信网络基础设施（例如泛在网络系统）使得智能设备可以根据用户要求运行是一个被广泛关注的问题。基础设施必须足够便宜，易于安装和维护，并且非常可靠。传统的高性能可靠网络都非常昂贵，并且很难在家居环境下管理。这些因素都使得泛在网络和 PLC 成为智能家居环境网络基础设施的最佳选择，因为它们可以随时使用，并且几乎没有安装成本。

165

4.4.2 智能电网

智能电网是使用模拟或数字信息以及通信技术（ICT）收集信息（例如供电方和用户的行为信息），并且能够自动根据信息做出反应的输电网络。它可以提高供电效率、可靠性、经济性以及供电可持续性，同时降低配电成本和电能耗费（Niyato et al. 2011）。

智能电网包括三种主要功能：

- 发电；
- 配电；
- 用电。

欧洲的智能电网策略已经在筹划安排，称为“智能电网欧洲技术平台”（Smart Grids European Technology Platform）。美国的智能电网政策在 42 U. S. C. ch. 152, subchapter IX § 17381 中有描述，智能电网技术的出现也预示着电力服务行业的根本再造，尽管主要是在技术框架层面（Torriti 2012）。

作为智能电网方案一部分的能源管理只解决了不同应用的能量消耗问题，这些应用的电能耗费可以通过智能电表进行监测，并且可以被中央控制器所控制，以平衡不同时间段的电能耗费，这是智能家居的一个重要应用。智能电表是可以记录用电量的电子仪表，它会每隔一小时或更少的时间记录一次信息，并且以至少每天一次的频率将信息发送回电力公司用来监控和计费。除了自动抄表功能，智能电表还可以用来双向通信以减少负载、远程连接/重连、连接煤气表和水表。这些操作都需要完成现场测试。

能量消耗也可以显示到用户的计算机上，这样的话，智能电表软件便可以提供大量的功能，例如，展示用电量变化和关闭个人设备。通信包允许智能电表作为一种集成到远程读出器的解决方案（www.open.pr）。

最近的调查结果显示，用户希望用能源实时定价计划换取远程控制家用设备，使用智能电表并结合家庭能源设备可以通过实时定价策略提供最佳的能源和峰值负载的节约方法。

166

这些智能家居解决方案的基础是泛在计算与 PLC 和 IoT 的结合，可由相关的能源提供商提供云计算服务。解决方案可以改变节能方式，并为新一代需求项目铺设基础设施。这些项目包括访问智能恒温器（最受欢迎的家庭能源管理设备），以及灯光控制和其他智能电器。

对于当前的数字原住民来说，智能手机/平板上的家庭能源管理 app 是最优先的考虑。

综上所述，可以看出智能家居能源管理系统可以提供必要的能源消耗跟踪服务。在能源管理系统中，能源消耗数据需要通过可靠的网络发送到一个中心位置进行分析。PLC 是作为家庭能源管理系统通信媒介的一个好选择，因为随着实时能源定价需求的增长，需要对能源消耗和

高峰时段负荷进行平衡。智能仪表和其与中央能源管理站的实时通信是实时定价应用的基础。PLC 将会作为中央能源管理站与家中智能仪表的通信媒介。

对于能源管理系统,更有远见的策略是进行控制和数据采集,这样就能够定期地监控电网负载,并报告给中央能源管理控制中心。这是从管理中心发出命令以管理发电和用电,命令需要实时执行以维持电网的可靠。因此,智能家居将会优先建立能源管理系统以及自动控制系统(包括基于 PLC 的智能家庭网络、基于规则的上下文管理系统以及 IoT 接入),用以监控能源消费并提醒住户,以及通过家中不同的能源供应设备来管理能源供应。构建如此智能的电网需要通过相关的智能电表获取实时在线信息以平衡负载,来自智能电表的实时信息可以远程更新用户的能源消费情况。

对 PLC 信号进行解码需要搞清楚如何对其进行读取。如何解码一个使用 PLC 的智能电表系统的详细细节可以在网上获得,这导致了一些隐私问题。一旦有人知道了如何解码 PLC 系统,他可能会发布出去,现在就有这样的网站发布这一类信息。因此,美国国会研究服务报告援引两项研究指出,智能电表每 15 分钟进行读取的数据足以判定在一个私人住宅中正在发生的事,包括可以通过植入的统计方法测量到的信息。例如:

- 什么时候用户在做饭;
- 什么时候用户睡觉或起床;
- 什么时候用户洗澡;
- 冰箱里存储了什么以及用户吃了什么;
- 什么时候家里没人。

这种信息的使用者众多,包括潜在的窃贼和绑架犯、小报杂志、政府机构、保险行业等。想象一下下面关于冰箱中信息被窃取的场景,某时某刻某人窃取了冰箱中通过 IoT、RFID 连同 PLC 技术存储的信息。例如,每天的早些时候,一个人喝了三罐可乐、吃了三个巧克力冰淇淋和两大块巧克力。这是此人的秘密,但是不幸的是,其他人黑进了这个人的智能家居系统,并把他的秘密连同他的名字和地址通过网络公布了出去。这可不是一个有趣的场景。因此,智能电网和智能计量网络的安全和隐私问题非常重要,并决定其是否能被公众所接受。因此,在这一领域的研究正在不断进行,智能仪表的用户需要保证他们的数据是安全的。

在文献 (Efthymiou and Kalogridis 2010) 中提及一个安全匿名技术,尽管大量的测量数据可能因为配电网络的要求被收集,但这些数据不会被特定标注为属于某个智能仪表或用户。但是,它们需要被安全地归入一个特定的位置。例如,在配电网络中的一群房子或公寓。

在文献 (Kaplantzis 2012) 中,智能仪表作为家庭网关,可以控制连接其上的设备,但更重要的是,其具备的开关这些设备的能力使安全成为了一个非常紧迫的问题。假冒成智能电表的黑客能够访问这些机密的信息,变更控制命令,并且拒绝合法访问。因此,像拒绝访问、伪装和未授权访问等威胁需要被及时处理,这样就能避免智能设备的通信媒介(无线和蓝牙)被黑客入侵、避免设备的智能卡被破坏、避免智能电网的 IT 基础设施被攻击以及避免通过网络发送的 IP 数据流被拦截。

如文献 (Kaplantzis 2012) 中所描述的,一个安全的智能电网在数据管理时必须遵循以下要求:

- 机密性:要求只有发送者和预定接受者能够理解消息的内容。由智能电网产生和发送的信息机密性对用户的隐私和电网的成功来说是至关重要的。
- 完整性:需要发送方和接收方确保数据是真实的,在传输中没有改变,在智能电网中,完整性意味着测量数据和控制命令在网络中传输时不会因为虚假信息而改变。

- 可用性：需要所有数据对合法用户都可访问和获取，智能电网不仅仅发送使用信息，还有控制信息和价格信息。这些信息的可用性对电网操作和维护来说至关重要。
- 不可抵赖：要求发送方和接收方不可否认他们参与了信息的传送和接收。当发生经济冲突时，参与数据处理的成员的责任认定是关键的，然而，网络产生的数据在其生命周期的不同阶段可能属于不同的实体（用户、数据管理服务、计费系统、公共设施）

4.4.3 智能家居能源管理

家庭层面对能源需求的增长催生出了高效的能源供应系统，用以管理能源消费。对个别家用电器有不同的负载控制系统，例如，水加热系统、冷却单元等。然而，智能家居环境能源管理系统（Smart Home Environment Energy Management Systems, SHE<sup>2</sup>MS）根据一组房主定义明确的能源使用限制和舒适程度来控制 and 监管电器设备。因为不同的应用可能在不同时段运行，它们并不需要全天运行，也不需要同一时间运行，并且一些电器设备可以在负载高峰时关闭，并在其他时段开启，以平衡负载和减少开支，这些做法的前提是不影响房主的舒适度。对这些不同的时间跨度的定义有很多考虑因素，例如，设备使用模式、住户舒适程度（当在一个特定时间跨度时，电器设备可以在不影响住户操作、需求，不同时段的能源价格或者能源负载下关闭）。

定义电器设备操作的优先级，SHE<sup>2</sup>MS 会在高峰时段关闭一些设备，以平衡负载并减少花费。低优先级的设备会先被关闭，例如，一个需要在第二天早上 8 点或 9 点前充满电的电能汽车（e-car）。如果到晚上时还没有对 e-car 进行充电，那么其优先级就会提高。加热和制冷电器在白天没人在家时优先级最低，其他电器（例如空调和洗碗机）的优先级取决于用户的需求。

对于更偏爱舒适度而不是节能的情况也需要定义，可能在某些情况下，用户并不想某些设备关闭，即使这些设备的使用已经超过设定负载。因此，SHE<sup>2</sup>MS 的性能基于潜在的能源限制，对于所有可操作的设备，需求条件限制必须被满足。对于可用性的限制会导致电器操作受到干扰，因为电器设备对能源的需求超过了 SHE<sup>2</sup>MS 设定的限制。设备将会从优先级最低的开始逐个关闭，因此，SHE<sup>2</sup>MS 的工作流程可以总结为以下几步（the Internet of Things class at TUC 2013 by Ahmed 2013）：

- 分析设备的操作状态；
- 计算能耗；
- 检查能源限制；
- 检查设备操作优先级；
- 检查所有设备的状态；
- 将定义在舒适状态下进行操作的电器开启；
- 如果能耗超过了预定限制，关闭低优先级设备；
- 恢复那些因为高优先级设备操作而关闭的设备。

此项目显示节能建筑需要实时监控、测量和设备管理，通过不同的能源管理控制技术和算法，可以减少建筑物的消耗。

4.5 RFID 应用

RFID 技术是物联网的核心技术之一。对于其成本，RFID 标签从 0.25 美元到 10 美元不等，具体取决于标签的功能、封装和应用。被动式标签的价格主要取决于标签体积，体积越小，价



钱越高。当普通标签标准化生产并普及时，其价格将会进一步降低。不久的将来，序列号只读的被动式标签的价钱将会从现在的 0.05 美元降低到 0.01 美元。表 4.7 显示了不同标签的价钱和使用领域（Miles et al. 2008）。

表 4.7 不同标签的价格和适用领域

标签单价 [ \$ ]	广域追踪			主动 (UWB WiFi)
500	被动式标签	本地 UHF 追踪 近场追踪 HF/LF		半主动式标签
50				
5				
0.50				
0.05				
距离 [ m ]	1	10	100	1000

麻省理工学院 Auto-ID 实验室引入了标签分类系统（EPCglobal 也在使用），标签分为了被动式、半主动式和主动式标签，如表 4.8 所示（Botero and Chaouchi (2010)）

170

- Class 0：只读标签，拥有 64 或 96 位简单 ID 号，可以是 EPC，不能被修改；
- Class 1：被动式读/写标签，只能由生产厂家或用户写入一次；
- Class 2：被动式读/写标签，能写入多次，具备额外的功能，比如数据记录和加密；
- Class 3：半主动式标签，具备额外能源供电，增加读写距离，提供多种新功能，如传感器；
- Class 4：提供与其他主动式标签的通信功能，具备 class 3 的所有特征；
- Class 5：具备阅读能力，可以与所有类型标签进行通信。

表 4.8 标签类别

标签类别	类型	功能
Class 0	被动式	只读
Class 1		可读，仅可写一次
Class 2		可读/写
Class 3	半主动式	增加识别距离
Class 4	主动式	标签通信
Class 5		具备读写器功能

RFID 应用的其他领域：

- 访问控制、跟踪、人及货物的跟踪；
- 动物监控；
- 数据仓库管理和分析；
- 国土安全；
- 家用；
- 定位跟踪；
- 出入关物流及供应链；
- 物流与供应链监控；
- 忠诚度、会员和付款；
- 行李跟踪；

- 医疗及制药；
- 乘客追踪；
- 生产、监控和维护；
- 产品安全、质量及信息；
- 公共交通；
- RFID 安全；
- 智能城市；
- 智能能源；
- 智能家居；
- 智能交通；
- 智能港口；
- 车辆跟踪；
- 其他。

171

对 RFID 应用更详细的介绍，例如，医疗领域中 RFID 可用于跟踪医疗器械，在追踪病人时，有以下几个方面（http4 2015）。

- 基于 RFID 的病人身份卡和医疗位置服务，当病人需要紧急医疗救助时，患者标签可以提供帮助；
- 基于 RFID 的腕带：医院用来识别患者，定位并获得患者状态更新，以更好的管理病患，同时提供精确的身份识别，保证新生儿的安全；
- 内置 RFID 读写器的门：用于监管阿兹海默症患者，防止他们进入危险区域；
- 基于 RFID 的处方容器：盲人和视力障碍患者使用置于处方容器上的设备，阅读 RFID 标签处方，并读出剂量。

除了病患跟踪，产品和设备跟踪在医院里是保证安全、可靠的重要工作，在这种场景下，要求下列活动：

- 跟踪设备的放射性同位素，包括从储存到运输、从管理到处理的各个阶段 RFID 标签和读写器可以使这一过程自动化进行，节省了时间和资源 具备读写功能的有源 RFID 标签可以用来探测容器和独立包装的密封完整性，标签可以记录失去密封性的时间和持续时间，甚至可以探测到装运期间发生的各种问题；
- 跟踪位置、操作时间以及用于医用设备的维护，例如呼吸机、麻醉机、血泵、输液泵等 RFID 标签和读写器可以自动地完成这些任务，从而节省时间和资源 具备读写功能的有源标签能够探测手术开始的时间，检测所需要使用的医疗设备，还可以识别对应的麻醉师，以正确使用各自的麻醉设备，标签可以记录开始、停止以及手术持续的时间。

另一个重要的医疗援助任务是在航运业，如《IATA Medical Manual》（IATA 2013）的第六章写到，大多数健康的旅客对坐飞机旅行没有不适感，然而，机舱环境对那些自身有健康问题的旅客是个不小的挑战 随着人口的增多和对航空旅行看法的转变，使得更多的人选择坐飞机出行，包括老年人和有健康问题的人 因此，每个航空公司都应该有医疗体检程序，国际航空运输协会（IATA）认为医疗指南需要具备一致性，并且基于公认的生理原则，用以保护乘客并保证航班的安全 在《IATA Medical Manual》的 6.1.2 节中，介绍了通用的医疗体检指导原则 基于这种考虑，开发了拥有图形化用户界面的通用 passenger-specific 数据库 在图 4.11 中，展示了最初的图形化用户界面，并展示了具有相关医疗信息的乘客信息

172



图 4.11 航空途中的乘客相关的医疗信息

173

如果飞机上发生了医疗事件，机长会询问飞机上是否有医师（MD），这些信息同样可以嵌入到扩展的乘客信息列表中，见图 4.12 中的图形化用户界面。这些信息可以与乘客座位信息合并，各种信息还可以与内置 RFID 芯片的乘客电子登机牌相关联。RFID 标签可以被机组人员随身携带的读写器读取，以自动地完成各项工作任务，节省了时间和资源，这样机组人员可以立即联系到相关的医师，以便请求他/她的紧急医疗援助。此外，MD 可以通过飞机上联网的医疗中心进行网络会诊，使病患得到及时的医疗援助建议或者飞机降落后的医疗救助。

### 4.6 案例研究：行李跟踪系统

RFID 用于自动识别/定位物理对象。例如，航运业的行李跟踪。Société Internationale de Télécommunication Aéronautique（SITA）报告指出在 2007 年全世界大约有 4200 万件行李丢失，这需要航空公司做出更多的工作。

- 2005 年：61% 的行李被错误发送，16% 没有运上飞机，13% 是因为票务问题和安检问题，7% 是因为装卸问题，3% 是因为错误的行李标签问题；
- 2008 年：相比于 2007 年，低于 20% 的行李被错误发送；
- 2009 年：相比于 2007 年，低于 40% 的行李被错误发送，但仍有 2500 万件行李被错误发送（http2 2014）；
- SITA 报告指出 52% 的行李错发发生在不同飞机的转运期间；
- 失物招领对机场来说耗费巨大，SITA 指出全世界所有航空公司大约耗费 39 亿美元用于失物招领；
- 通过条形码标签无法实现减少行李丢失；

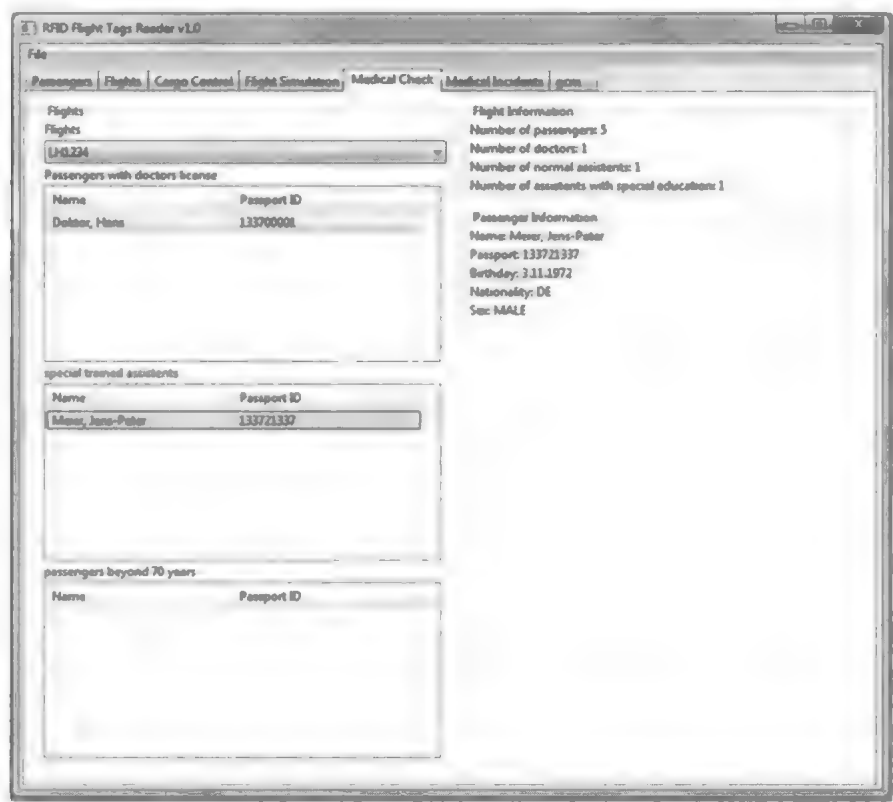


图 4.12 航空途中的医师 - 乘客相关信息

- 替代的解决方案是使用 RFID 标签；
- SITA 指出使用 RFID 标签后错发的行李数量减少。

通过使用 RFID 标签除了可以减少行李丢失和错发外，还可以识别行李，并实现从登记到装运的全程自动化行李运输。

使用 RFID 标签的行李或货物可以加快装运和卸货速度，还可以加快卸货时的识别速度，这个过程无需行李所有者在场。对于不断增长的旅客数量，案例研究可以关注以下方面：

- 减少调度时间；
- 行李误传的代价很高昂；
- 多件行李。

RFID 与条形码相比：

- 快速扫描；
- 高内存容量；
- 最少的读取错误次数。

案例研究以下场景：

- 托盘（塑料碗）在传送带上高速运动
- 分拣时倾斜托盘
- RFID 芯片阵列
- 速度大大快于条形码
  - 大约 10m/s
- 系统

- 频率：13.56Mhz
- 被动式标签
- 内存
  - 8 kBytes FRAM
  - 20 kBytes EEPROM

175

行李装载进飞机需要通过货物传送带，传送带会穿过相关区域的门，RFID 读写器可以安装在门上以扫描货物标签。这需要读写器系统根据门的宽度（取决于飞机）具备一定标准。

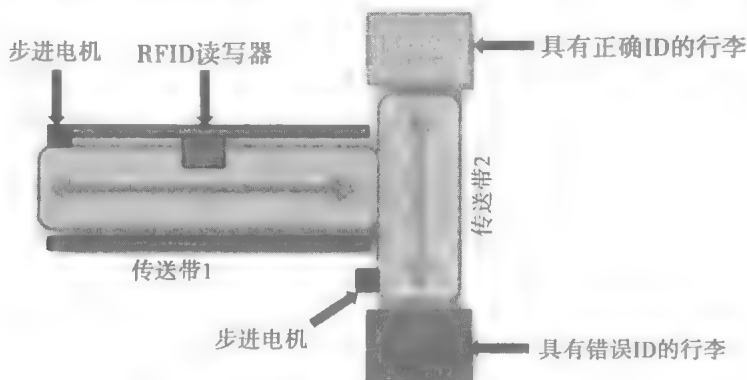


图 4.13 基于 RFID 的行李传送系统模型

对于在行李货舱中的行李传送，图 4.13 展示了基于物理模型的用于测试两种场景的模型（Waldmann 2013）。

场景一


此场景包含了覆盖范围为 1m 的电感耦合系统和 13.56Mhz 的工作频率。为了保证行李可以在各种位置被检测到，需要配备多个读写器。读写器以 0 度、45 度和 90 度的角度固定在墙上和天花板上以确保标签的可靠读写，拥有 128Byte 内存容量的被动式智能标签非常合适。


场景二



用齿轮安装在天花板的读写器具备狭长的圆锥形监测范围，整个行李舱的内部区域都可以被检测到。工作频率为 868MHz，通常使用内存容量为 128Byte 的被动式智能标签。

为了运用 RFID 飞行标签软件原型，已经定义好类 MasterControlProgram、CheckInTab、Engine 和 Manager。这些类之间的关系展示在下面摘录的类图解中，MasterControlProgram 类生成一个 Manager 类的对象，而 Manager 类生成 Engine 类的对象，如图 4.14 所示（Waldmann 2013）。

176

案例研究从 MasterControlProgram 类开始。图 4.15 中显示了其窗体。提供给用户四个标签页来选择，首先显示的是 Passengers（乘客）标签，由三组表所组成，左边的表显示的是乘客，可以通过点击窗体下方的  按钮来添加乘客，见图 4.15（Waldmann 2013）。

单击  按钮后，会弹出一个窗体，其中包含了 passenger-specific 信息，如图 4.16 所示，NB：护照号码包含 9 或 11 位数字，国籍用大写字母标注。

生成一个乘客后，单击窗体右上角的  按钮生成一件对应此乘客的行李，之后需要过渡到 Flights 标签页生成一个航班。点击  按钮会弹出一个窗体，可以在其中输入航班数据。NB：航班 ID 由两个大写字母和其后的四个数字组成（见图 4.17）。

生成航班后，用户可以通过点击右下角的  按钮再次进入 Passengers 标签，将乘客分配给

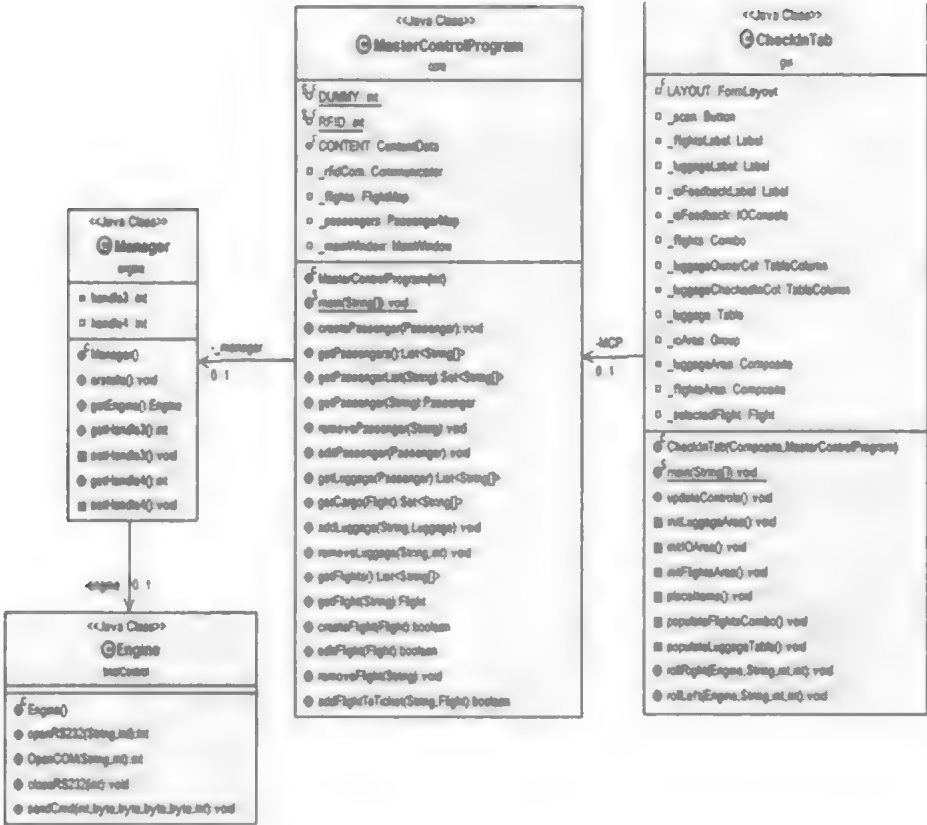


图 4.14 类图



图 4.15 MasterControlProgram 类的图形用户界面


相应的航班。此操作完成后,信息由“Ticket invalid”变为“Ticket valid”,表明操作成功。包含了乘客、行李、预订航班的信息的数据集将会写入标签中。通过点击  按钮完成此操作。



图 4.16 passenger-specific 信息的图形用户界面



图 4.17 flight-specific 数据的图形用户界面

到目前为止,信息已经写入标签,行李控制进程开启,当行李由传送带经过读写器时,行李上的标签 ID 被读取。

选择一个航班上所有乘客和安检过的行李都是可控的。单击 Scan Luggage 按钮开启行李控制进程。传送带的电机启动,当行李到达读写器时,行李的 ID 被读取到。扫描过后,软件将会做出相应行为。

- 行李属于此次航班:传送带 2 (标记为绿色) (见图 4.13) 逆时针运动将行李传送到正确的行李车中;
- 行李不所属此次航班:传送带 2 (标记为红色) (见图 4.13) 顺时针运动将行李传送回进行重新检查 (见图 4.18)

基于 RFID 的行李运输系统的物理演示如图 4.19 所示。

## 4.7 练习

1. 物联网的含义是什么?
2. 描述物联网的体系结构。
3. 在物联网中对象 (object) 或物体 (things) 是指什么?
4. 举一个物联网中对象或物体的例子。
5. 感知 (sensing) 和执行 (actuating) 技术的含义指什么?
6. 举出感知和执行技术的例子。
7. RFID 的含义是什么?
8. 举出 RFID 架构的例子。
9. RFID 标签的含义是什么?
10. 描述 RFID 标签的体系结构。
11. RFID 读写器的含义是什么?
12. 举出 RFID 读写器架构的例子。



图 4.18 乘客和航班分配的图形用户窗口



图 4.19 行李运输演示系统

13. 电容耦合 (capacitive coupling) 的含义是什么?

14. 举出电容耦合的例子

15. 电感耦合 (inductive coupling) 的含义是什么?

16. 举出电感耦合的例子

17. 智能标签的含义是什么?

18. 举出智能标签架构的例子。

19. 有源标签的含义是什么?

20. 列举不同形式的有源标签

21. RFID 中间件的含义是什么?
22. 描述 RFID 中间件的特征。

23. 被动式标签的含义是什么?

24. 描述被动式标签的架构。

25. RFID 标签的价格和应用领域如何?

26. 举出被动式标签的例子。

27. RFID 标签种类包括什么?

28. 举出被动式标签的例子。

29. RFID 架构模型是指什么?

30. 举出 RFID 架构模型的一个例子。



31. 家庭自动化的含义是什么?
32. 列举家庭自动化的好处。
33. 传感器的含义是什么?
34. 描述应变传感器的结构和功能
35. 接触式传感器的含义是什么?
36. 举出接触式传感器的例子。
37. 非接触式传感器的含义是什么?
38. 举出非接触式传感器的例子。
39. 模数转换器的含义是什么?
40. 描述模数转换器的量化函数。
41. 传感器网络的含义是什么?
42. 举出传感器网络的一个例子。
43. 传感器节点的含义是什么?
44. 举出传感器节点的例子并描述其优点。
45. 无线传感器的含义是什么?
46. 描述无线传感器的架构和功能。
47. 无线传感器网络的含义是什么?
48. 描述无线传感器网络的架构和功能
49. 无线传感器网络中路由的含义是什么?
50. 举出无线传感器网络中路由的例子。
51. 固定路由和自适应路由的含义是什么?
52. 列举无线传感器网络中的固定路由和自适应路由方案。
53. 死锁和活锁的含义是什么?
54. 列举无线传感器网络中死锁和活锁的例子
55. 无线传感器网络中簇的概念是什么?
56. 举出无线传感器网络中簇的例子。
57. 电力线通信的含义是什么?
58. 描述电力线系统的体系结构。
59. 电力线通信的目的是什么?
60. 列举家庭中使用高比特率电力线通信架构的例子。
61. 智能电表的含义是什么?
62. 列举智能电表的例子。
63. 家庭自动化的含义是什么?
64. 描述家庭自动化的优点

## 参考文献

- (Ahmed 2013) Ahmed, W.: Power line Communication Energy Management System, Project work at TU Clausthal, 2013
- (Andrew et al. 2012) Andrew, S., Balandin, S., Koucheryavy, Y. Eds.: Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networking, 12th International Conference NEW2AN 2012 Proceedings, Springer Publ., 2012
- (Auto-ID 2013) <http://www.autoidlabs.org/>; accessed February 12, 2013
- (Berlin and Gabriel 1997) Berlin, A. A., Gabriel, K. J.: Distributed MEMS: New Challenges for Computation. IEEE Computational Science and Engineering, Vol. 4, pp. 12–16, 1997
- (Biddlecombe 2005) Biddlecombe, E.: BBC News, 17.11.2005
- (Botero and Chaouchi 2010) Botero, O., Chaouchi, H.: RFID Applications and Related Research Issues, pp. 129–156, In: The Internet of Things., Ed. H. Chaouchi, Wiley Publ., 2010
- (Bumiller et al. 2010) Bumiller, G., Lample, L., Hrasnica, H.: Power Line Communication Network for Large Scale Control and Automation Systems, IEEE Communications Magazine, Vol. 48, pp. 106–113, 2010
- (Carcelle 2006) Carcelle, X.: Power Line Communications in Practice. Archtech House Publ. 2006
- (Chaouchi 2010) Chaouchi, H.: The Internet of Things – Connecting Objects to the Web. J. Wiley Publ., 2010
- (Cisco 2008) Wi-Fi Location-Based Services 4.1 Design Guide, Cisco Systems Inc. 2008, Text Part Number: OL-11612-01
- (Dargie and Poellabauer 2010) Dargie, W., Poellabauer, C.: Fundamentals of Wireless Sensor Networks: Theory and Practice, John Wiley Publ., 2010
- (Echelon 2015) Echelon 2015: <http://www.echelon.com/>
- (Efthymiou and Kalogridis 2012) Efthymiou, C., Kalogridis, G.: Smart Grid Privacy via Anonymization of Smart Metering Data. In: Proceed. 1st IEEE International Conference on Smart Grid Communication, pp. 238–243, IEEE Publ. 10.1109/SMARTGRID.2010.5622050, 2010
- (Floerkemeier et al. 2008) Floerkemeier, C., Langheinrich, M., Fleisch, E., Friedemann, M., Sarma, S. E. Eds.: The Internet of Things, 1st International Conference IOT Proceedings, Springer Publ. 2008
- (Giusto et al. 2010) Giusto, D., Iera, A., Morabito, G., Atzori, L., Eds.: The Internet of Things, 20th Tyrrhenian Workshop on Digital Communications, Springer Publ. 2010
- (Goldstein et al. 2005) Goldstein, S. C., Campbell, J. D., Mowry, T. C.: Programmable Matter. Computer, Vol. 38, pp. 99–101, 2005

- (Gubbi 2013) Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., Palaniswamia, M.: Internet of Things (IoT): A Vision, Architectural Elements, and Future Directions, In: Future Generation Computer Systems. Vol. 29, pp. 1645–1660. Elsevier, 2013
- (Harish 2010) Harish, A., R.: Radio Frequency Identification Technology. In: The Internet of Things – Connecting Objects to the Web. Chapter 2, pp.35–52, J. Wiley Publ., 2010
- (IATA 2013) Medical Manual 2013, 6th Edition, ISBN 978-92-9252-195-0
- (IOT 2013) <http://postscapecs.com/internet-of-things-history>; accessed February 12, 2013
- (Kahn et al. 2000) Kahn, J. M., Katz, R. H., Pister, K. S. J.: Emerging Challenges: Mobile Networking for Smart Dust. J. Communication and Networks, Vo. 2, pp.188–196, 2000
- (Kaplantzis and Sekercioglu 2012) Kaplantzis, S., Sekercioglu, Y. A.: Security and Smart Metering. European Wireless 2012 (<http://titania.ctie.monash.edu.au/papers/06216815.pdf>)
- (Kärkkäinen 2003) Kärkkäinen, M.: Increasing efficiency in the supply chain for short shelf life goods, International Journal of Retail & Distribution Management, Vol. 31, Number 10, pp.529–536, 2003
- (Lewis 2004) Lewis, F. E.: Wireless Sensor Networks. In: Smart Environments: Technologies, Protocols, and Applications, pp. 1–18. Eds.: Clark, D. J., Das, S. K., John Wiley Publ. 2004
- (Mehrotra et al. 2004) Mehrotra, S., Butts, C., Kalashnikov, D., Venkatasubramanian, N., Rao, R., Chockalingam, G., Eguchi, R., Adams, B., Huyck, C.: Project RESCUE: Challenges in Responding to the Unexpected. J. Electronic Imaging, Displays, and Medical Imaging, pp. 179–192, 2004
- (Miles et al 2008) Miles, S. S., Sarma, E., Williams, J.: RFID Technology and Applications, MIT University Press, 2008
- (Moeller and Vakilzadian 2014a) Moeller, D. P. F., Vakilzadian, H.: Ubiquitous Networks: Power Line Communication and Internet of Things in Smart Home Environments, In: Proceed. IEEE International Conference on Electro Information Technology, pp. 596–601, DOI:10.1109/EIT.2014.6871832, IEEE Conference Publications, 2014
- (Moeller and Vakilzadian 2014b) Moeller, D. P. F., Vakilzadian, H.: Wireless Communication in Aviation through the Internet of Things and RFID, In: Proceed. IEEE International Conference on Electro Information Technology, pp. 602-607, DOI:10/1109/EIT.2014.6871833, IEEE Conference Publications, 2014
- (Niyato et al. 2011) Niyato, D., Lu, X., Ping, W.: Machine-to-Machine Communications for Home Energy Management System in Smart Grid, IEEE Communication Magazine, Vol. 49, pp. 53–59, 2011
- (Poslad 2009) Poslad, S.: Ubiquitous Computing, John Wiley Publ., 2009
- (Roberti 2005) Roberti, M.: The History of RFID Technology, RFID Journal, 2005; <http://www.rfidjournal.com/articles/view?1338/2>
- (Schönefeld and Moeller 2012) Schönefeld, J., Moeller, D. P. F.: Runway Incursion Prevention Systems: A Review of Runway Incursion Avoidance and Alerting System Approaches. In: Progress in Aerospace Sciences: Vol. 51, pp. 31–49, 2012
- (Sohraby et al. 2007) Sohraby, K., Minoli, D., Tnati, T.: Wireless Sensor Networks: Technology, Protocols, and Application, John Wiley Publ., 2007
- (Stockmann 1948) Stockmann, H.: Communication by Means of Reflected Power,
- (Torriti 2012) Torriti, J.: Demand Side Management for the European Supergrid, Energy Policy, Vol. 44, pp. 199–206, 2012
- (TUC 2013) <https://video.tu-clausthal.de/videos/iasor/vorlesung/iot-ss2013/> 20130621/iot-20130621.html
- (Waldmann 2013) Waldmann, L. RFIF for precise identification of air cargo: Optimization and risk analysis and follow up development of a prototype RFID workbench. Bacher Thesis (in German), Hamburg, 2013
- (Wang and Zhang 2012) Wang, Y., Zhang, X. Eds.: Internet of Things. International Workshop Proceedings, Springer Publ., 2012,
- (Weber and Weber 2010) Weber R. H., Weber, R.: Internet of Things – Legal Perspectives, Springer Publ. 2010
- (Weiser 1991) Weiser, M.: The Computer for the 21st Century. In: Scientific American, pp. 94–100. 1991
- (Yick et al. 2008) Yick, J., Mukherjee, B., Ghosal, D.: Wireless sensor network survey, Computer Networks, Vol. 52, pp. 2292–2330, 2008
- (Zaheeruddin and Mandviwalla 2005) Zaheeruddin, A., Mandviwalla, M.: Integrating the Supply Chain with RFID: A Technical and Business Analysis, In: Communications of the Association

for Information Systems, Vol. 15, pp. 393–427, 2005  
(Zhao and Guibas 2004) Zhao, F., Guibas, Wireless Sensor Networks: An Information Processing Approach. Morgan Kaufmann Publ. 2004

## 链接

(http1 2015) [http://en.wikipedia.org/wiki/Sensor\\_node](http://en.wikipedia.org/wiki/Sensor_node); accessed January 21, 2015  
(http2 2014) <http://www.sita.aero/knowledge-innovation/industry-surveys-reports/baggage-report-2010>  
(http3 2014) <http://www.sita.aero/content/baggage-report-2008>  
(http4 2015) [http://www.ups-scs.com/solutions/white\\_papers/wp\\_RFID\\_in\\_healthcare.pdf](http://www.ups-scs.com/solutions/white_papers/wp_RFID_in_healthcare.pdf)

## 普 适 计 算

本章首先简单地介绍了普适计算。5.1 节给出了普适计算的定义，并举例说明了一些相关应用。5.2 节介绍了普适通信的基本原理以及正在发展的关键研究领域。接着 5.3 节描述了普适计算中的智能设备和服务。5.4 节涵盖了普适计算和可能应用中的标记、传感和控制等重要主题。5.5 节关注自治系统，分析其行为和复合结构，并描述了其容错行为。5.6 节详细描述了一个在机器人中使用普适计算的案例。5.7 节包含了普适计算领域的综合问题。本章结尾处给出了参考文献以及进一步阅读的建议。

## 5.1 普适计算发展史

原始的术语普适计算是由 Mark Weiser 于 1988 年在施乐帕洛阿尔托研究中心 (PARC) 自创的，当时他担任计算机科学实验室主任。他设想在未来将计算技术嵌入日常物品中来支持日常活动，同样适用于工作场所、家庭等 (Krumm 2009)。

Mark Weiser 编写的普遍计算的基础文章数量并不多，但在其领域中具有广泛的影响。普适计算最初由 PARC 的研究人员提出，在 Weiser 于 1991 年在《Scientific American》上发表的文章“The Computer for the 21st Century”中可以找到其简要概括 (Weiser 1991)。Weiser 对于普适计算不同方面的报告可以在以下参考文献中找到：(Weiser 1993a, b, 1994)

因此，普适计算（也称为普及计算）描述了包括某些类型的附件、嵌入式装置、计算机、传感器、标签、网络以及其他类似的智能设备（移动、可穿戴、无线）、智能环境（嵌入式计算系统）（见第 2 章）、传感器-执行器网络 and 智能交互（设备和环境之间的紧密集成和协调）的当前技术（智能事物或对象），它们如何作用于更高可用性和更大范围的计算机设备。这些设备用于更广泛的信息物理系统（计算和通信系统、人力、物理和虚拟）以及更多的环境和活动 (Poslad 2009)。这意味着普适计算可以被“随时随地”地引入。

上文提到的智能设备涉及有关数字设备的讨论。它们通常通过协议（例如控制器协议、链路管理协议 (LMP) 以及逻辑链路控制和适配协议 (L<sup>2</sup>CAP) 等蓝牙专用协议、对象交换 (OBEX) 或无线 (WiFi) 协议等非蓝牙专用协议) 连接到其他设备或无处不在的网络中，例如对象与对象 (O2O) 和事物与事物 (T2T)。WiFi 是一个使用 IEEE 802.11b 标准的术语，3G 电信网络支持服务，互联网协议版本 6 (IPv6) 支持单播地址、任播地址和组播地址。这些协议可以在一定程度上以交互方式和自治方式运行。此外，智能设备可以是智能手机、平板电脑、智能手表等。在很短的时间内，智能设备已经超出了任何其他形式的智能计算和通信，并且是物联网 (IoT) 的有利推动因素 (见第 4 章)。智能设备可以支持各种形式的要素，其具有与普适计算相关的一系列属性，并且用于智能环境，例如信息物理系统环境、以人为中心的环境和分布式计算环境 (http1 2015)。

一般来说，信息物理系统 (CPS) (见第 3 章) 具有计算、网络和物理对象或事物之间的紧密集成和协调，其中各种设备联网以感知、监视和控制物理世界。此外，对信息物理系统没有普遍的定义。一些最常见的特征包括物理对象或事物的网络能力、多重和极端尺度的网络、时间和空间尺度上的复杂性、较高的自动化程度以及更可靠甚至可证实的操作 (Xia and Ma

2013) 许多研究人员和实践者指出,信息物理系统改变了我们与物理世界的互动 (CPSRR 2008; Xia et al. 2008)。

以人为本的环境一词是指人类能够进行最高水平工作的身体和心理需求。环境解决方案包括通信链路和接口以及满足用户需求和能力的基本物理环境。此外,以人为本的环境也建立在有关人的信息基础上,这些信息将用来创造环境解决方案。关于认知能力、能力和局限性、社会需求和任务要求的研究结果和数据将用于创建环境解决方案,使用户能够以最高的条件生活和工作,而不管年龄或能力。

目前分布式计算环境正在发展成为一个新的前沿,其计算不再与其环境脱钩。这源于对外部物理数据和过程计算的整合的需要,以普适地控制周围环境 (Kobaa and Andersson 2008)。

最后,通过文献 (Poslad 2009) 的描述,智能环境是指多样的设备环境。

- 虚拟计算环境:使智能设备随时随地访问相关服务。
- 物理环境:可嵌入各种不同类型的智能设备,包括标签、传感器和控制器。这些设备可以具有从纳米到微米到宏观尺寸的不同形状因子。
- 人类环境:人类、个人或集体,为设备形成智能环境。智能手机、智能手表、表面安装设备 (可穿戴式计算) 以及可感知和控制的嵌入式设备等智能设备可能伴随着人类。可穿戴式计算机尤其适用于需要比仅硬件编码逻辑更复杂的计算支持的应用程序。如今,可穿戴计算是一个研究课题,包括用户界面设计、增强现实、模式识别等。

对于这种多样的环境,普适计算系统中的核心研究课题将其定义为易失性执行环境,它寻求能够使设备相互发现、建立通信链接并开始使用彼此的服务的技术和标准 (Bardram and Friday 2010)。当便携式设备进入智能或普适的空间时,需要创建一个易失性执行环境,因为设备要发现并使用附近的资源。这可以通过可用于按需使用的服务发现技术轻松实现,包括 Jini、通用即插即用 (UPnP) 和蓝牙发现协议。更为重要的是普适计算系统和应用程序主要是分布式的,它们需要在不同设备之间进行交互,例如:

- 智能移动设备;
- 智能嵌入式设备;
- 智能服务器设备;
- 智能环境。

由于普适计算的易失性以及易失性执行环境服务的基本需求,这些设备使用不同的网络功能,并提出了一个根本性的挑战 (Couloris et al 2005)。

Marc Weiser (1991) 为普适系统提出了三种形式的设备,分别是宏观尺寸的 Tab、Pad 和 Board。随着技术的创新,Weiser 引入的形式的范围已扩展到更多样化、更有用、高性能的普适设备,Poslad (2009) 对其介绍如下:

- 智能尘埃:一个小的微机电系统 (MEMS),范围从几毫米到微米到纳米。它们包括检测例如物理或化学量的传感器,或者可以嵌入到智能衣服中,将传感器、执行器、计算能力、电源等集成到布料中,整体系统作为一个交互式通信网络。然而,智能尘埃通常在无线计算机网络上运行,并且分布在一个区域上以执行任务,例如通过射频识别技术 (RFID) 进行感测 (见第4章)。如果没有比自身更大的天线,微型智能尘埃通信设备的范围可以是几毫米到厘米。这些设备可能会受到微波辐射以至于电磁失效和破坏 (http2 2015)。
- 皮肤:基于发光、导电聚合物和有机计算设备的织物,可以形成更灵活的非平面显示器表面,例如有机发光二极管 (OLED) 显示器和可用于智能衣服和窗帘的产品。正在

调研的另一种方法是将普适计算能力放在衣服上，诸如键盘、液晶显示器（LCD）、电池、硬盘驱动器和鼠标等计算机传统部件已经演变成适合穿着在衣服上的新形式。大多数可穿戴设备通过无线基础设施或织物区域网络（FAN）进行连接。通过使用具有不同功能的天线，FAN 与传感器和/或存储器以及具有非连通性的 FAN 基站进行连接（Hum 2001）。这项技术可用于救援人员进行通讯、导航、搜救、疾病管理和预防、康复以及全面的生活方式管理（即运动、健身、体重控制、压力管理、治疗等）。可以在没有背光的情况下工作的 OLED 显示器使这一切皆有可能。因此，它可以显示深黑色等级，并且可以比 LCD 更轻薄。在较低的环境光照条件下，OLED 屏幕可以实现比 LCD 更高的对比度。通常，OLED 器件可以在可见光谱上产生颜色。与简单的单片集成在不同的基板上，这些不同的材料特性使得 OLED 具有优于现有显示和照明技术的关键优势（Buckley 2013）。MEMS 器件可以溅射或涂在不同表面上，使得各种物理表面结构可以起到网络化 MEMS 的作用。

- 粘土：集成的 MEMS 可以形成任意的三维形状，作为类似于不同种类的物体的工件。这样的集合称为一个有形的用户界面（TUI），人们通过它们在物理环境中与数字信息进行交互。这种接口可以是电子纺织品的一部分，这是一种新型的纤维材料，其中感测和通信被集成到编织结构中，以监测感兴趣区域中的信号和变量。

188

普适计算有着相当广阔的愿景，但危险的是它可能变得太过笼统。普适计算有时视为虚拟现实的反面。在虚拟现实中，人或物体在计算机生成的世界中。相反，普适计算将使计算机在人与物形成的世界之中。虚拟现实的定义可以从虚拟和现实这两个术语的含义中得出。这里所说的虚拟意味着“近”，而现实是人们的体验。因此，虚拟现实的基本含义是“接近现实”，指的是一种具体的现实仿真。相比之下，普适计算是人为因素、计算机科学、系统工程、软件工程和社会科学的复杂结合。

综上所述，术语“普适计算”是指所谓的第三次计算浪潮。第一次浪潮由大型计算机组成，接着是个人电脑，在这种情况下用户和机器在桌面上彼此不安的凝视。在普适计算领域，或平静的技术时代，技术已成为人们生活中的背景。在这种背景下，普适计算是移动和可穿戴计算研究近来繁荣的推动力，尽管它与移动计算或其超集不一样。

基于 Mark Weiser 对未来技术无处不在的深刻理解，处理能力的可用性越来越高，其可见性也随之下降。他观察到，最深刻的技术是那些消失的技术。它们把自己编织在日常生活的结构中，直到与之无法区分。

## 5.2 普适计算基础

普适计算是存在于计算、网络和嵌入式计算系统交叉点的新兴计算学科（见第 2 章）。今天几乎所有的计算机都连接到互联网。因此，普适计算可以描述为一种方法，它把剩余的东西连接到因特网上，以便随时随地提供信息。由于事物变得越来越小，普适计算以微型无线互连计算机的形式变得无处不在，嵌入到任何类型的日常事物或对象中。除了微型计算机，传感器也变得越来越小，从而产生了智能嵌入式计算系统，该系统能够检测周围的环境，并使其具有信息处理和通信能力。这导致了智能系统的全新和创新的应用（例如，找出智能系统所在的位置，以及智能系统附近的其他对象，或者过去智能系统发生了什么）。它们也可以与其他智能设备进行通信和合作，并且理论上可以访问各种互联网资源。事物和电器可以以上下文敏感的方式做出反应和操作，这似乎是智能的，但又不是真正的智能（Mattern 2001）。

189

因此，普适计算能够实现全新的应用（例如，合作的设备创建新的紧急功能，这可能会产

生巨大的经济和社会影响) 它还可以解决技术兼容的有关问题, 并创造一个充满技术的世界, 其中现实与信息网络空间紧密相连, 甚至与之融合。这使得智能设备能够缩小嵌入式计算系统和信息物理系统之间的差距。

科学领域的最新发展将使未来的计算机变得完全不同, 这意味着计算机将不再是可识别的, 因为它将融入其周围环境。这将是纳米技术和材料科学研究的成果。正如 Mattern (2001) 提到的, 一个重要的实例是发光聚合物, 其能够形成由高度柔性、薄且可弯曲的塑料薄膜组成的显示器。目前也正在进行电子墨水和智能纸的研究, 这将使新笔和新纸成为真正的移动输入/输出媒体。然而, 这种技术在实际应用中还不到几年, 例如将计算机作为折叠路线图的形式。目前正在开发的另一个重要项目是将眼镜直接投射到视网膜上, 作为传统输出媒体的替代品 (Mattern 2001)。

相比之下, 美国传统字典 (<http3> 2015) 将普适计算介绍为无处不在。考虑到这一点, 可以说个人电脑的想法是错误的; 笔记本电脑、动力手表和知识导航器只是一个过渡阶段。原因是这些设备无法使计算成为日常生活中不可见的部分。因此, 创建能够在环境中隐形的微型计算设备对普适计算是至关重要的。此外, 所有电脑必须能够在任何时间任何地方相互通信, 并且知道或记住它们的位置。它们还必须了解用户的偏好和位置, 必须直观可用, 并可能在不久的将来使用自然的人际沟通形式。

因此, 普适计算正在为异构设备集合创建一个全新的计算环境模式, 包括嵌入在日常事物或对象中的隐形计算机, 例如自动化设备、罐、衣服、杯子、家居设备、移动设备、个人设备、安全装置、车辆、壁式装置、可穿戴装置等, 这些设备位于工作平台、居住建筑物、安全区域、生产设施等环境中。这些设备可能具有不同的操作系统 (OS)、具有协议的网络接口以及输入功能, 例如传感、跟踪、控制、输出等。

普适设备之间的相互作用可以是隐形的、不可见的或通过感知自然交互来实现, 这些交互需要大量的传感器来进行语言、手势等更多的交互。因此, 普适计算中的相互作用超出了传统 PC 普遍的 O2O 模型, 成为多对多 (M2M) 模型, 其中相同的人、事物或对象可以使用多个设备与多个设备或同一设备进行交互。

关于智能设备和技术的可用性, 可以为大量应用程序域创建普适的环境。Bardram 和 Friday (2010) 已经介绍了一些例子, 例如教室、家庭、医院、会议室和车辆。

### 5.2.1 在普适空间中学习

对课堂教育影响最大的是移动技术的可用性。移动技术使未来的劳动力能够接受新的学习理念, 提高他们的学习能力:

- 创造力;
- 主动性;
- 反应能力。

这将通过提高他们以下的技能来促进其适应性:

- 管理不确定性;
- 在文化、亚文化和社区之间进行交流;
- 谈判冲突。

学习的重点在于坚持。因此, 终身学习将在人的生活中运用正式和非正式的学习机会, 通过以下方式促进可持续发展, 提高就业和自我实现所需的知识和技能

- 学会学习: 掌握学习而不是结构化知识的获取;

- 学会工作：为人们提供现在和将来需要的工作类型，包括创新和适应未来工作环境的学习；
- 学会做人：教育促进人的全面发展，包括思想与身体、智力、敏感、美审和灵性。

在表 5.1 中，显示了几种学习方法与所使用的技术（Sharples et al. 2005），

表 5.1 学习方法与所使用技术之间的对应关系

学习方法	使用技术
以学习为中心	以用户为中心
情景学习	移动学习
协作学习	网络学习
普适学习	普适计算
终身学习	持久学习

使用移动技术，学习可以视为处于情景、协作、普适、普遍或终身的状态，补充实际知识以更新在集中领域的最新知识。此外，移动技术允许与他人共享知识，而与其位置无关。因此，将以人为本的功能嵌入在数字设备或单元中的移动技术使学习变得普遍存在。当以任何格式或版本存储内容时，这些设备或单元也会变得更加耐用，从而可以建立向后兼容性。这使得人一生中学习的数字记录得以组织和保存。

移动技术的持续增长、互联网在其他地方的可用性的增加以及软件和电信业务的不断变化，使得连接一切的机会成为可能。首先出现的机会之一是移动和普适计算的概念。因此，普适计算使计算机能够随处可见。早期形式的普适计算网络在移动设备中的广泛使用是显而易见的。因此，这是有史以来第一次，世界上有比人更多的小工具，包括越来越多的只与其他机器交流的设备。据来自 GSMA 智能数字分析数据，活跃的移动设备和人类的数量超过了 72 亿。截至今日，GSMA 提出的实时跟踪移动设备的数量达到了 72.2 亿，而美国人口普查局则表示，人口数量仍在 71.9 至 72 亿之间（http4 2015）。

随着计算机的普及，它们不再是活动的焦点，这使得它们将在生活中消失。将普适计算引入到普适学习中（u-Learning），使学生们使用他们的移动技术来连接多种数字嵌入式设备和服务。因此，在普适学习课堂中，学生们可以在任何空间中，通过移动技术进行连接并与各种嵌入式数字设备和服务进行交互。故而，普适学习应当以可持续的方式加强教育，并消除传统教育的许多限制，例如，允许根据学生需求进行定制，并建立基于移动技术的普适社区的基础：

- 可追溯；
- 可识别；
- 可连接。

智能手机用作低成本的数字计算和通信设备。因此，平台容量创建了连接到普适空间的事物、对象和设备之间共享信息的概念。随着普适计算成为现实，通过物联网（IoT）的范式形成了普适学习的约束，当比人更多的东西连接到互联网时，互联网将发生改变（见第 4 章）。因此，物联网指的是在一个类似互联网的结构中唯一可识别的事物或对象及其虚拟表示。在这方面，物联网可以视为一个包括普适计算和网络的智能世界，通过嵌入到现实世界的事物和对象中的传感器和执行器更容易地实现不同的活动，并通过有线和无线网络连接到互联网。当物联网中的事物和物体可以感知环境、解释数据并相互通信时，它们成为了理解复杂性并迅速响应事件和违规行为的设备。因此，普适计算使计算能够嵌入到普适学习空间或普适学习环境中。普适计算代表了普适教育的一个环境，其中数据以嵌入式、数字移动技术为基础的事物和



/或对象的形式存在。事物和物体通常作为自然系统、物理系统、人类、传感器、执行器和计算机引入。它们只需要在那里并与普适学习空间相连即可。

### 普适学习和移动数字化学习

将普适学习与移动数字化学习进行比较,移动数字化学习的嵌入水平可能较低,而移动性水平相对较高,因为它是诸如智能手机和掌上电脑等轻量级设备,它们比较轻薄,可以手持并且在任何地方使用。然而,为了能够随时随地地进行普适学习,有必要使用无线通信技术进行互联网访问。

因此,普适学习需要嵌入数字移动技术,正如前面提到的,由于学习者及其移动设备正在移动,这就需要一个由分布在整个普适学习位置的传感器支持的活跃的普适学习空间。根据传感器的位置、检测到的信号电平提供了访问普适学习空间位置的对象的独特签名。这是传感器网络在给定位置和与被访问设备或人员的距离所产生的结果。电力线通信定位还能够为普适学习空间的多个位置提供分室级定位。目前的电力线通信定位系统的中值误差为0.75m,90%的精度为1m。因此,定位是普适计算中的一个重要问题。目前存在使用了诸如红外(IR)、射频(RF)、负载感测、计算机视觉和听觉等底层信号技术的几种解决方案,其具有与需求、精度和超过空间和物体数量的成本相关的不同特征。可能需要注意的是,没有一个适合所有可用的位置系统。每个系统必须根据上述各种维度对应用程序域进行评估。参考文献(Varshavsky and Patel 2010)给出了一个有趣的位置跟踪技术表,用于评估特定位置系统的一系列因素。除此之外,动态学习必须支持与普适学习环境中的嵌入式计算机通信(Ogata and Yano 2012)。

发展普适学习必须考虑到现有学习理论在最佳实践方面的成果,例如在教育环境中信息与学习者的理解之间的结构化关系。这有助于确保学习者不仅仅是在有意义的背景之外学习事实。例如,如果一个学生理解某事发生的原因和方式,而不仅仅是被告知它是真的,那么这个信息对于学生来说就更为重要,因此更有意义。

从技术的角度来看,实现普适学习空间所需的主要组件有

- 微型控制器:嵌入在物体或对象中,它允许存储有关物体或对象的信息。
- 服务器:向客户端提供对文件和单元的访问,以及一个将有关对象或单位、用户和交互的所有数据作为共享资源存储到计算机网络的数据库。
- 无线通信技术:主要以蓝牙和WiFi的形式。
- 传感器:用于检测与普适学习空间相邻的对象或单位的变化,并用于识别在普适学习空间中存在的学习者。

因此,普适学习可以定义为在日常生活中由嵌入式计算机网络基于特定类型的学习环境所支持的学习(Lyytinen and Yoo 2002)。这一发展使得学习者能够接触到全球通信且为所有教育水平的学生提供的大量资源。在微型控制器及其在教育应用的初步影响之下,电子学习和移动电子学习的引入代表了教育领域正在发生变革。

普适计算在教育中的使命代表了普适学习从普适计算概念中走出来的又一个进步。普适学习是普遍而持久的,允许学生灵活、冷静、无缝地获取教育材料。从这个意义上讲,普适学习有可能通过消除与其他形式的学习存在的许多限制来使教育变得更加容易。此外,适应性学习与普适学习的整合可能会通过基于学生个人需求定制学习计划来实现教育领域的创新。适应性学习本身就是一种以计算机为互动教学手段的教育方法。在这种方法中,计算机根据学生的学习需要,根据他们对问题和任务的反应来改编教育材料。

普适学习中学生与设备的无缝互动可以概括如下:

- 学生到达并观察集中在系统工程领域的对象。相邻的传感器检测学生的存在,并将该

对象的数据发送给学生的移动智能设备。

- 对象将访问普适学习环境服务器模块，并请求有关学生的信息

然而，对象能够进行联网和独立操作，也可以单独操作或者向学生传输数据，例如学生以前是否访问过数据或者由普适学习环境的服务器系统工程模块给出最适合该学生的学习模式等。假设学生对过去的信息做出了正确的回应。将通过向学生的智能设备发送所需的内容，并将学生的响应发送到普适学习环境服务器组件来传送这些信息（Jones and Jo 2004）。传递所需消息的通信工作流程如下（Moeller et al. 2013）。

工作流程	被访问的对象	信息通路
1	1 号学生访问编号为 1 的系统工程对象	
2		将 1 号系统工程对象的内容发送给 1 号学生
3	1 号学生回复收到的内容	
4		分析学生对 1 号系统工程对象内容的响应以确定学生对系统工程内容的理解所占的百分比。假设 1 号学生理解了 55% 的内容。这一结果将被传给普适学习空间中的其他对象
5	1 号学生访问编号为 2 的系统工程对象	
6		普适学习空间意识到学生的表现，并试图让 2 号系统工程对象解释不被理解的内容以及剩余的内容

因此，在普适学习访问（会话）期间，1 号学生与系统工程对象中的普适学习空间的交互可以被跟踪，并存储在系统工程模块服务器的普适学习空间中。如果 1 号学生再次连接到普适学习空间，系统就会了解到 1 号学生的知识，并积极地协助 1 号学生的学习进度。这样可以增强学习经验，更深入地了解系统工程领域的内容，使用普适学习空间中的社会技术环境将学习本地化和个性化。

因特网的普及以及信息和通信技术的飞速发展，使人们有机会将所有内容与任何东西连接在一起，包括系统工程学习对象与学生。因此，基于物联网的普适学习空间中的系统工程学习事物和物体可以感知个人学习，解释数据并与个别学生交流。所以，普适学习已成为更好地了解当今网络物理系统的复杂性并快速响应事件和违规行为的方法。

主要目标是创建一个定制的普适学习过程来开发、编辑并实现可持续发展。普适学习方法的核心重点在于各种综合过程的开发和测试，包括：

- 获得教师资格认证（自上而下模式），使他们能够以最低的成本在短时间内获得有效开发和实施普适学习资料的经验；
- 开发工具以简化注重教学、适当技术、低成本和可持续的普适学习过程的资质、生产和实施；
- 生产高品质的普适学习内容（学习对象），以使合格教学人员为更有效地学习提供一个场所，有效利用普适学习课程模块和其他普适学习者的设备，以及在不同的学习场景中为不同的学习者复制系统和普适学习资料。

5.2.2 智能家居和电力线通信

在诸如智能家居等普适计算环境中，我们周围的设备基于对我们的存在和行为作出反应的

互连技术。创建智能家居需要以下要素：

- 通讯与集成元件；
- 控制和遥测装置；
- 电力消耗以及安全和报警服务；
- 智能家居控制中心；
- 电话和数据服务；
- 视频和音频设备。

196

智能家居控制中心连接到互联网，所有智能家居设备都通过微型控制器、平板电脑或智能手机进行无线控制（Snowdon 2009）。例如，智能家居系统的时间控制确保了在早上按需要并按时进行浴室升温。定时与供暖系统的散热器恒温器通过无线连接，并且由智能家居控制中心自动控制。早晨淋浴后打开窗户以减少浴室内的水分，将立即由窗口传感器接收，并转发到智能家居控制中心，降低散热器温度以节省能源和加热成本。当居民离开房屋时，智能家居控制中心查询所有传感器信息，以确保所有用户的限制已启用，例如，在居民离开期间将室内温度调低到较低水平。居民在离开工作时忘记关闭洗手间的开放窗口，智能家居控制中心通过智能手机通知用户，询问窗户是否应该保持打开或关闭，并执行居民回复。

关于上述智能家居控制策略和控制装置，将紧凑型智能计量系统嵌入到智能家居中，重点是测量和智能调节能源消耗。这意味着当居民离开房间或办公地点时，灯将被关闭。此外，外出工作时可以减少室内温度，并且可以在居民下班回家之前，将温度提高到舒适的水平。它也可以从外部进行控制，以确定家里的窗户是否关闭，咖啡机是否关闭等。此外，能源供应商可以每天、每周或每月观察能源消耗情况。因此，通过将智能设备与普适计算机系统结合使用，智能家居的使用将会更加丰富：

- 性价比；
- 环保；
- 可靠；
- 安全；
- 简单。

这些智能设备可以通过互连的传感器和执行器收集数据，并根据需要进行实时响应。因此，普适计算将允许通过在智能家居技术环境中分发数据以自动进行日常的物理任务，例如在基础设施、基本设施和家用电器（Gann et al. 1999）等方面。从用户的角度来看，智能家居系统应该简单地日常家庭活动提供便利，以便将人们从家庭工作中解放出来，并帮助他们更加独立地生活。

因此，智能家居系统技术的未来将取决于它们在何种程度上提高生活质量，并为将人从智能家居基础设施中解放出来提供解决方案，因为它们不是设计智能系统、在歧义的情况下推断并降低成本的系统管理员。详情请见第4章。

197

### 智能家居服务

实施智能家居服务需要可靠的通信网络基础设施。智能家庭网络中的大多数扩展技术都是有线技术。电气电子工程师协会（IEEE）2010年发布的IEEE 1901标准，用于通过电线进行数据传输（电力线通信，简称PLC），使得通过电力线网络进行广播成为可能。IEEE 1901-2010标准定义了建筑物内部和外部的最大速度（媒体上可达到500Mbit/s）、频率范围（高达100MHz）和电力线的数据传输流。IEEE 1901.2标准的扩展定义了智能电网应用中通过电网进行数据传输，以进行远程读取电力、燃气或水以及家庭自动化网络中的电表。因此，家庭电力

线通信网络系统允许智能设备轻松地编程应用程序。因此,上述因素使普适网络和电力线通信成为智能家居环境的网络基础设施的良好候选者,因为它们具有良好的可用性,并且电力线通信几乎没有或有很少的安装成本 (Moeller and Vakilzadian 2014)。

即使在智能家居中,电力线通信网络的保护是一个主要的问题,因为使用电线意味着可以从智能家居外部访问网络。为了保护电力线通信网络,可以使用 Power Packet Utility 等工具配置网络加密密钥。为此,只需将电力线通信设备逐个连接到通过网络电缆安装了配置工具的智能家居服务器上 (Carcelle 2006)。

除了在智能家居中使用的电力线通信之外,基于 110 ~ 220V/50 ~ 60Hz 电力线通信技术还用于高和低比特率应用,并且主要局限于一种类型的电线,但是有些可以在分配网络的级别和场所的布线之间交叉。用于在电子媒介中传输电力线通信信号的主要技术是在载波频率中心附近的低压电信号中添加低振幅调制信号。因此,电力线的可用性使私人 and 公共用户能够利用这些线路进行宽带通信,而无需任何额外的基础设施。电气公司利用低比特率数据传输 (<50Kbit/s) 的电力线通信在 3 ~ 148kHz 频段进行信号传输,以监控家庭自动化产品,例如智能电表每隔一小时或更少的时间就记录一次电能的消耗量,并且至少每天将该信息传回给电力公司进行监控和计费。

198

因此,智能电表可以作为家庭网关引入,它能够不断监视附加设备,但更重要的是将其打开和关闭。因此,安全成为一个紧迫的问题。如参考文献 (Kaplantzis and Sekercioglu 2012) 所述,安全智能电网在管理数据时必须遵守以下要求。

- 保密性: 要求只有发送方和预期的接收方才能理解消息的内容。智能电网传输的信息的保密性对用户隐私和电网成功至关重要。
- 完整性: 要求发送方和接收方确保消息是真实的,并且在传送过程中未被改变。在智能电网中,完整性意味着不允许通过网络传输欺诈信息,从而防止测量数据和控制命令的改变。
- 可用性: 要求所有数据均可访问并可供所有合法用户使用。由于智能电网不仅要传递使用信息,而且要控制信息和定价信息,因此信息的可用性对电网的成功运行和维护至关重要。
- 不可否认性: 要求发送方和接收方不否认他们是传播和接收信息的双方。当涉及金融交互时,数据交易成员的责任是至关重要的。然而,网络生成的数据可以在数据生命周期的不同时期由不同的实体 (客户、数据管理服务、计费系统、公用事业) 拥有。

能源需求的增加导致需要一个有效的系统来管理家庭层面的能源消耗。对于个人电器,例如供热系统、房屋冷却单元等,有不同的负荷控制程序。针对智能家居环境能源管理系统 (SHE<sup>2</sup>MS) 提出的模型根据精确定义的能源使用限制来监视和控制装置,并且由业主决定舒适的程度。不同的家电在不同的时间运行,并且不是在任何时间段都被需要。它们可能不需要在同一时间运行,或者其中一些可以在能量消耗的高峰时段关闭,同样它们的操作不会影响家庭的舒适度。为了平衡负载和减少费用,负载可能需要转移到其他时段。这些不同时间范围的定义可以使用不同的因素,例如家电使用模式、家庭居民的舒适程度 (如果可以关闭家电来影响家庭的运营/需求)、不同时间的能源价格或在特定的时间阶段可用的能量负荷。

必须定义设备操作的优先级。由于 SHE<sup>2</sup>MS 会关闭某些设备以平衡负载或降低高峰时间的费用,因此优先级最低的设备将首先关闭,例如第二天上午 8 点或 9 点需要重新充电的电动车。如果在此之前没有完成,电动汽车在夜间充电是优先级最高的。白天没有人在家时加热或冷却设备的优先级最低。可以根据用户的需求对其他设备 (如冰箱或洗碗机) 的使用进行优

199

先排序。

同时,必须定义舒适度偏好与成本节省,因为在特定的时候,居民不想要特定的设备被关闭,即使其使用导致负载过剩。因此,SHE<sup>2</sup>MS 1 作是基于潜在能量限制的可用性的。所以,对于所有运行的设备,必须满足条件需求限制。利用可用性限制将导致设备分散操作。如果操作设备的能源需求超过了SHE<sup>2</sup>MS的可用设置限制,将从最低优先级开始关闭设备。因此,SHE<sup>2</sup>MS的工作流程可以总结为以下步骤,下面介绍了TUC中关于物联网的一个项目(http5 2015):

- 检查可用的能量限制;
- 检查所有设备的状态;
- 计算能量消耗;
- 检查操作设备的优先级;
- 分析电器的运行状况;
- 如果电器工作在定义的舒适度以下,请打开这些设备;
- 如果负载超过限制,请关闭低优先级设备;
- 当高优先级设备的最短需要时间已经完成或不再需要设备操作时,恢复低优先级设备的操作。

因此,节能建筑解决方案需要通过实施不同的能源管理控制技术和算法以实时监控、测量和管理建筑系统,从而降低建筑物的能源消耗(Snowdon 2009)

### 5.2.3 普适计算的核心特性

将普适计算与分布式信息和通信技术系统(DICT)区分开来的主要特征是普适计算是以人为本的,个性化环境交互的一部分,而不会引起用户的关注。因此,普适计算是指分布式计算、移动计算、位置计算、移动网络、上下文感知计算、传感器网络、人机交互和人工智能等众多研究课题。普适计算的核心为小型、廉价、强大的网络处理设备,分布在日常生活中的各个层次,通常转向明显的共同场合。在这种背景下,智能家居普适计算环境可能将基于个人生物识别传感器的照明和环境控制器加入到衣服中,从而使智能家居环境中的照明和加热条件得到不可察觉和持续的调节。

鉴于普适计算系统是物理环境的一部分,并被用于物理环境中,与传统的信息和通信系统相比,普适计算系统更容易实现对物理环境的感测和监控。此外,普适计算系统可以通过采取行动来适应环境并对以下核心属性进行控制(Poslad 2009):

- 微型计算机需要网络化、分布式和透明访问;
- 人机交互需要被隐藏;
- 微型计算机需要上下文感知才能优化其在各自环境中的运行;
- 微型计算机需要自主操作,无需人为干预,以区分普适计算与人机交互;
- 微型计算机需要通过智能决策和智能组织互动来处理多种动态活动和交互作用:
  - 不完整和非确定性的交互;
  - 组织成员之间的合作与竞争;
  - 通过共享上下文、语义和目标来实现丰富的互动。

因此,普适计算代表了计算机工程和计算机科学在系统和软件工程、软件工程、系统建模和用户界面设计中的挑战。所以,基于命令行、菜单驱动或图形用户界面(GUI)的当代人机交互模型是不适当的技术,不足以用于普适计算模式。这表明逻辑进程是一种自然的交互作用,因为它更适用于普适计算,由于普适计算被设想为一个系统,数十亿的迷你或微型普适互

通设备将在全球范围内传播。

普适计算是一个由多个层次组成的方法，每一层都有自己的规则和角色，它们构成了普适系统。这些层的功能如下。

- 任务管理层 (TML):
  - 监控用户任务、感测和索引;
  - 映射环境中服务所需的用户任务;
  - 管理复杂的、与用户相关的操作;
- 环境管理层 (EML):
  - 监测资源和能力;
  - 映射服务需求和特定功能的用户等级状态;
- 环境层 (EL):
  - 监测相关资源;
  - 管理资源的可靠性。

201

关于普适计算能力的分散规划，设备必须能够自发地配置网络并改变它们。这通常需要使用移动设备而不是固定设备，从而增加了使用设备和优化网络并使之适应环境需求的可能性。当使用普适计算进行通信时，必须考虑到人的行为，这就要求简化设备的使用，这是普适计算的一个重要方面，因为用户不喜欢适应计算机的使用方式。这种限制似乎在技术上难以实现，因为它不仅需要理解语言，而且需要解释意义。如果使用人类手势和面部表情进行普适计算通信，则需要有相同的有效性。因此，超越经典的键盘、屏幕和鼠标的当前技术状态不包括适合人机交互 (HCI) 中普遍存在的计算用户界面的需求的核心组件，其输入和输出技术尚未设想。

普适计算用户界面将围绕新一代技术范例来构建，重新塑造用户与他的个人信息、环境、物件甚至是朋友、家人和同事之间的关系。面临的挑战不在于提供下一代鼠标和键盘，而是以流畅和无缝的方式进行输入和输出的收集。普适计算用户界面将借鉴传统 GUI，但将超越专用设备，例如 PDA、智能手机或笔记本电脑，以支持用户生活中的活动，其中包括一些当前不受计算支持的活动 (Quigley 2010)。

一般来说，与当前的移动或游戏设备和应用程序相比，普适计算用户界面必须考虑更广泛的输入。普适计算用户界面可能依赖的数据或知识的示例如下 (Quigley 2010)

- 监督、采访、制定时间表、编制议程等活动;
- 计算资源:
  - 网络带宽;
  - 内存;
- 可以挖掘和推断的数据;
- 环境信息:
  - 噪音;
  - 光;
- 附近的用户和其他用户的身份;
- 意图;
- 生理信息:
  - 听力;
  - 心率;

202

- 偏好;
- 资源可用性:
  - 打印机;
  - 传真;
  - 无线接入;
- 社会信息:
  - 会议;
  - 派对;
- 空间信息:
  - 位置;
  - 运动速度;
- 时间数据:
  - 一天或一年的时间;
- 用户识别的资料。

此外, 普适计算通信的隐私和安全性也必须得到保证, 因为存储在普适计算通信网络的设备上的数据的访问分为被授权的和未经授权的访问。这就需要在无线网络中为低计算能力的微型设备提供数据隐私和安全性。为了提出隐私解决方案的想法, 需要考虑普适计算如何影响隐私, 以及哪些技术方法可以对抗或减轻这种影响。然而, 这需要清楚地了解到底应该保护什么。只有这样, 才能解决普适计算的隐私和所需技术对策的特殊影响。如参考文献 (Langheinrich 2010) 所述, 传统计算机系统 (如数据库) 的隐私问题常常以普适系统相同的方式使用, 因为大多数普适计算应用程序都是基于标准组件构建的。这种普适计算技术解决方案可以限于如参考文献 (Langheinrich 2010) 所介绍的关于普适计算技术引起的特定威胁的例子。

#### 5.2.4 普适计算形式化用例

普适计算将计算融入到我们的日常生活、设备和环境中。因此, 人们及其智能设备的使用是普适技术研究的重点, 特别是了解人们的需求和对普适计算应用和服务的反应。这项研究与人机交互密切相关, 其中包括心理学和人类学研究, 以了解人们如何在实地研究、焦点小组、民族学和启发式评估的基础上与技术进行交互。迄今为止, 案例研究是在研究实验室或受控环境之外进行的 (即现场实地研究) (Brush 2010) 以及将具体的可用性证据集成到业务流程的用例中。

在参考文献 (Brush 2010) 中, 对普适计算领域进行了很好的描述, 它是基于三种普适计算领域的研究。

- 当前行为研究: 人们在用新的选项做什么?
- 概念验证研究: 新技术是否在现实世界中起作用?
- 使用原型体验: 原型的使用如何改变人们的行为或允许他们做新事情?

如参考文献 (Brush 2010) 中提到的, 存在 Gaver 等人描述的其他领域的研究, 包括探索有趣的互动或参与互动的普适计算技术。Brush (2010) 描述的领域研究重点关注家庭技术共享和家用技术的使用情况以及用户与手机的接近度的当前行为。在他的概念验证领域研究中, 用例是上下文感知的权利管理和团队意识。到目前为止, 已经确定了实地考察的类型。下一步是为研究所要回答的最重要问题设计实地研究。

- 计划进行多长时间的实地考察?

- 需要收集哪些数据？
- 实地考察的参与者需要做什么？

这些问题需要确定参与者的情况、计划研究、建立控制条件、记录数据、采访参与者以及编制必要的统计数据。

相比之下，用例表示是基于代表事件突出特征的用例集合的概念 (Lee et al. 1998)。因此，用例包含一个通常是非结构化或半结构化文本的描述以及系统执行的一系列操作 (Camp 2000)。此外，用例概念应该是有效的，动作应该导致可观察的结果，因此排除不完整或多个序列。最后，用例的可观察结果应该对参与者是有价值的。用例可以使用图形符号表示。它们作为未来普适计算系统使用的预测以及与设计的普适计算系统交互的预期愿景。一些作者认为它们可以扩展到大型复杂系统，因为它们可以进行改进和扩展，而很少或不会丢失先前的信息 (Gunstone 2011)。用例也可以以这样的方式使用，以便在设计和实现过程中进行需求追踪 (Lee et al. 1998)。

5.3 智能设备：组件和服务

任何具有独立计算能力的设备、仪器或机器都被认为是智能设备。它们是通过不同的无线协议 (例如蓝牙、NFC、WiFi 等) 连接到其他设备或网络的数字设备，其可以在一定程度上以交互方式和自主方式进行操作。因此，智能设备可以以其自身的功能和相关的环境来进行智能操作。它们是多种产品的一部分，并且仅需要被分类为智能设备的最少的物理组件。这些组件是

204

- 电源：提供给设备的任何电力能源；
- 内存：存储操作；
- 处理：在快速、高效地执行操作要求方面具有足够的处理性能；
- 通信接口：与智能空间内的其他设备和服务进行通信。这是一个重要的组成部分，因为如果设备能够与智能空间内的其他设备进行交互，并让其他设备和服务与其进行交互，则它必须提供与其他设备通信的方式 (Davy 2015)。

智能设备通常通过上述协议连接到其他设备或网络，并且可以在一定程度上以交互方式和自主地运行。一些流行的智能产品如智能手表、智能电视、智能相机和智能手机，如图 5.1 所示 (http6 2015)。



图 5.1 智能设备的选择

如果一个智能设备参与调用智能设备服务或订阅状态更改通知，则它必须包含一个有效的充当智能设备向智能普适空间提供服务的客户端的控制组件。控制组件包含允许其与智能设备



交互的各种内部组件。

[205]

智能设备的服务组件由各种内部组件组成。这些组件一起允许智能设备在输入时将其服务发布到智能普适空间,并允许其他智能设备和服务以抽象的方式理解和调用这些服务。服务组件允许智能普适空间内的其他智能设备和服务访问设备的内部操作,而无需制造特定的控制或驱动程序。这通过使用抽象服务定义来描述智能普适空间中的其他智能设备和服务,以了解如何调用智能设备的操作。通过这个抽象接口,可以调用智能设备的内部操作 (Davy 2015)。

Web 服务描述语言 (WSDL) 是用于描述服务的快速发展的技术。WSDL 提供了一种通过 Internet 向其他异构系统提供服务的方式,无论其实现如何。WSDL 允许客户通过一种称为简单对象访问协议 (SOAP) 的通用协议来进行业务交流,这是一种在计算机网络中实现 Web 服务中交换结构化信息的协议规范。WSDL 和 SOAP 使用 XML 信息集, W3C 规范根据一组信息项描述 XML 文档的抽象数据模型。只要客户端和服务端可以解析并理解 XML 文档,客户端和服务端的实现就可以完全独立。

WSDL 文档由以下主要元素组成 (Davy 2015)。

- 类型: 提供数据类型定义用来描述在端点之间的信息交换;
- 消息: 表示正在传送的数据的抽象定义,消息由逻辑部分组成,每个逻辑部分与某种类型的系统中的定义相关联;
- 端口类型: 抽象操作集,每个操作都是指输入消息和输出消息;
- 绑定: 指定由特定端口类型定义的操作和消息的具体协议以及数据格式规范;
- 端口: 指定绑定的地址,从而定义一个通信端点;
- 服务: 用于聚合一组相关的端口。

使用这些主要元素,可以描述异构服务之间的同构交互。随着设备制造商开发这些设备的服务,如果没有一定程度的服务抽象,就不可能以同构的方式将这些异构服务提供给环境。使用 WSDL 隐藏服务实现异构性的概念非常适用于智能空间和智能设备的互操作性。

此外,通过作为物联网的一个有用技术,智能设备将超过任何其他形式的智能计算和通信的部分 (见第4章)。该术语还可以指普适计算设备,这种设备具有普适计算的一些特性。

[206]

智能设备可以设计为支持各种形式因素和与普适计算有关的一系列属性,可以执行多个应用程序,支持不同程度的移动性和定制,并可用于不同的系统环境,例如:

- 物理世界;
- 以人为本的环境;
- 分布式计算环境。

智能设备的特点如下:

- 整合系统硬件和软件资源,满足指定的智能设备限制;
- 远程访问外部服务和执行命令;
- 智能环境的访问,例如人与物理和网络世界的互动;
- 普适计算属性意味着设备需要联网、分发、通常是隐藏的但是可以访问;
- 促进环境意识,以优化其在环境中的运作。

因此,基于传感器的智能设备的信息处理和通信有助于某种程度上自主地操作,即无需人为干预,这意味着自我控制。在智能设备中,智能传感器收集和整合信息,并交付结果 (例如,交给一个卓越的规划和决策系统)。因此,主要优点如下: (1) 从任何地方到上级规划和控制体系,对上级系统状况和环境信息进行简单的收集、解释和传播; (2) 直接获取实际数据和决策。

然而，由于普适计算的研究和应用的范围广泛，并且种类繁多，引入一组封闭的属性定义所有普适计算设备是不容易的。随着互联网向服务网络的发展，创造出物联网的范式。这个想法是将所有设备连接到互联网，然后创建基于互联网的网络服务和智能化。普适计算的想法是缩小计算机的大小，使得计算系统可以嵌入到任何东西中。普适计算中的智能设备和服务极大地利用了通信。因此，设备互操作性对于智能普适空间是非常重要的，可以采用自上而下的方法来实现所需的三个级别。

- 智能世界：代表智能普适空间，这样的信息世界中互操作性意味着信息在不同设备中具有相同的含义。一般来说，智能普适空间是能够与用户交互的设备和服务的物理空间，物理环境和服务始于智能普适空间，智能普适空间的目标是协调使用集成的物理和计算环境，为用户提供切实的好处，以支持他们的任务；
- 服务世界：代表服务领域，应用程序能够跨设备边界使用服务；
- 设备世界：表示具有物理层互操作性的设备网络。

从这一点可以看出，互操作性是普适计算中的智能设备和服务的重要特征

207

5.4 标记、传感和控制

数字组件的制造不断变小、变快、变得更便宜，并且更多的低功耗组件可以轻松地部署在一个巨大的和普遍的规模中（Poslad 2009）。正在进行的 MEMS 工作使得能够在纳米级尺度上进行传感和驱动。小型化的可能性迁移到日常工作和生活的各个方面。将计算和通信技术嵌入到任何事物和任何地方将成为现实。因此，MEMS 成为智能普适计算设备、服务和环境的有力推动力，从而更好地利用扩展的互联网协议第 6 版（IPv6）地址空间（见第 4 章）。

因此，标记、传感和控制的主要目标可以是在智能普适空间中支持各种信息物理感知和分析服务。这需要收集和整合来自不同来源的各种传感信息。大量收集的自然和社会感知数据被分析和转换为有用的、可操作的信息，以对物理世界中的事物或物体和人员提供适当的反馈。

因此，主要的技术挑战是通过组合传感器和分析服务来创建用户定义的智能传感器，目标是创建可以配置为收集一系列集成传感器数据的各种传感器的简单节点。这需要设计智能传感器来封装感应源的具体和复杂的细节。这种设计的目的是简单地组成智能传感器来访问异构传感源。另一个重要的要求是设计一个可以根据需要组合异构传感器的复合可伸缩智能传感器。需要这一要求来确保对环境进行全面监测，使得响应者能够评估各种信息来源的整体影响。

为了有效地依赖解耦的服务组件，这些组件的接口应该基于定义良好、可解释和明确的标准。此外，标准化的接口将允许通过今天和将来设想的许多信息物理系统轻松提供各种服务（Simmon et al. 2013）。

208

5.4.1 标记

物理标签是数字标签，是具有身份的网络设备，例如射频识别（RFID）标签。RFID 系统用于识别和跟踪目标，包括标签、可读/写设备和用于数据收集、处理和传输的主机系统。RFID 标签由芯片、存储器和天线组成。当这些标签附加到或链接到物理对象时，它们提供了一种审核物理空间和进程的方法。因此，RFID 是用于识别物体或人员的新兴技术，通常认为是能够实现普适计算网络的技术之一，因为它具有比传统的标识方式（例如条码系统）更强大的优点和优势。

与条码系统相比，RFID 标签具有识别速度快、灵活性强、智能化程度高等优点（Wang et al. 2007；Xia et al. 2008）。支持 RFID 的系统解释数据并做出一些决定。此外，它们可以在各

种环境条件下工作。最近出现了一个巨大的需求,这是由于新兴的和已经存在的应用需要越来越多的自动识别技术以便于管理、提高安全级别、增强访问控制和跟踪并减少所需劳动力。可以每天使用 RFID 应用的简单列表如下 (Mobashsher et al. 2011):

- 自动付款交易;
- 汽车行业;
- 医疗保健和医院;
- 高价值资产追踪与管理;
- 制造;
- 海运码头作业;
- 军事;
- 药品管理系统;
- 公共交通;
- 零售库存管理;
- 公路收费;
- 仓库管理系统

因此, RFID 标签可以识别和跟踪物理对象。应用于上述应用领域的实际项目使物理对象成为能量消费者,因为 RFID 技术使用能量标签或一些应用于有源标签的能量来激活用于发送数据的能量。能量的摄取量非常小,但任何物理对象都可以成为能源消费者。物理对象正在被引入到数字世界以及数字能源世界中。RFID 技术成为一种通过简单注入将物理对象映射到数字世界的转换功能。这个简单的断言产生了几种含义:一个真实世界对象的数字表示,它的数字克隆可以作为对象的第二生命。

RFID 标签具有各种形式和功能特征。如第 4 章中介绍的,可将标签分类为有源标签和无源标签。

- 读/写范围较长的有源 RFID 标签:存在于各种形状和尺寸中,并提供多种可选功能,例如运动传感、通话按钮和温度检测。激活意味着标签具有为标签提供动力的内部电源,以便传输频繁的 RF 信号。放置在整个被覆盖区域的读写器网络可以接收标签的射频传输。根据环境和资产特征,有源标签可以读取高达数百米的范围。一些标签使用无线接入点作为读写器,而其他标签使用专有读写器。
- 读/写范围较短的无源 RFID 标签:根据应用存在多种格式。出于自动识别和安全目的,它们可用于许多行业。例如超市和图书馆的库存系统,当商品被拿出或退回时,它能自动感知和跟踪商品是否会未被支付而从超市中取出。无源标签至少包含两部分:用于存储和处理信息、调制和解调射频 (RF) 信号和其他专门功能的集成电路,以及用于接收和发送信号的天线,如图 5.2 所示。为了引发信号传输,需要外部电源。

然而,无源标签比有源标签便宜得多,因此应用更广泛。在任何 RFID 实现中,标签占成本的很大一部分。一个标签的成本可能在 0.1 到 10 美元之间,并且取决于形式、操作频率、数据容量、范围、微芯

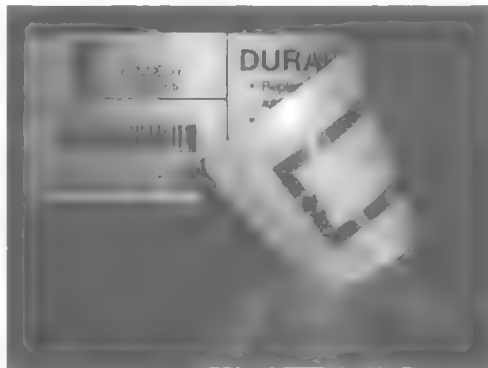


图 5.2 来自 Harland Simon 的无源标签 (http7 2015)

片的存在与否以及读/写存储器等因素。

210

关于移动资源的位置，WiFi 实时定位 (RTL) 可以为这一集中区域带来好处，这可以通过允许昂贵的设备定位使用或维修来节省大量成本。此外，关于移动资源位置的实时信息可以消除呼叫、等待以及通常与设备缺点有关的不利因素。

5.4.2 传感

传感器检测某些物理性质的变量，例如温度、湿度、压力、亮度、加速度和热辐射，或化学性质的变量，例如 pH 值、离子强度和电化学电位，或物理条件以及其环境的变化。这些变量通过物理或化学效应检测，并转化为可处理的电信号进行测量或控制。

传感器用于无数的大多数用户都不知道的日常应用。随着大小在 100 nm 到 100μm 之间的传感器的出现，传感器（例如加速度计）可用于检测汽车撞到物体并触发安全气囊，或当智能手机从水平转向垂直位置时屏幕以相同的方式移动。

易于使用的微控制器平台使传感器的使用范围超越了传统的温度、压力或流量测量领域。传感器也可以根据它们所属的领域进行分组，例如角速率、化学、电力、重力、磁力、机械、辐射和热能，并被分布在传感器阵列中，例如磁性、角速率和重力，这就是所谓的 MARG 传感器（http8 2015）。

纯传感器的直接输出通常不能以计算机可以处理的形式提供。因此，需要信号调节以将传感器输出转换成适当的形式。除了放大和滤波之外，最重要的信号调节功能是原始或预处理的信号转换。放大意味着检测到的小的原始信号被放大器提升。传感器信号也可能会受到来自噪声或不良输入的干扰。因此，在不同的安排中可以使用由电阻器、电容器和放大器组成的有源滤波器，或者由电阻器、电感器和电容器组成的无源滤波器。应用包括飞机和航空航天、汽车、制造系统、医疗系统和机器人。

传感器灵敏度是一个重要的特征，因为它表示当输入量测量发生变化时传感器的输出的变化量，但是一些传感器也会对测量结果产生影响。因此，需要将传感器设计为对所测量的结果没有影响的。

正如 5.4 节开始部分所述，技术进步允许在微观尺度上制造的传感器作为微型传感器，即所谓的 MEMS 传感和驱动技术。在大多数情况下，与宏观传感器相比，基于 MEMS 的微型传感器有着更高的速度和灵敏度，并且在检测单个小实体（例如细菌、病毒、纳米颗粒或单个分子）时具有更好的可检测性。在较大尺度上工作的传感器通常测量传感器上均匀分布的物理或化学物质的变化。因此，通常以单位面积的质量来讨论石英晶体微量天平 and 表面等离子体共振技术的灵敏度。虽然这个值可以转化为测量的总质量的值，但是这些装置的尺寸将绝对质量敏感度限制在毫微克的范围内（Waggoner and Craighead 2007）。这导致了传感器的新发展，这些传感器超越了简单的传感、运动或捕捉图像来传递信息的领域，例如建筑环境中的位置、触觉和粒子或化学物质的存在。这些传感器开启了智能系统的潜力，允许对象以更智能和复杂的方式与周围的世界进行交互。

211

可以将数百万个协作传感、驱动和动力结构的集合作为一种新的可编程物质形式引入，因为它们可以以任意三维形状自由组合（Goldstein et al. 2005），并形成更流畅和灵活的计算机和人机界面、灵活的设备和有形的计算机接口（Poslad 2009）。因此，智能传感器和传感器融合技术是许多汽车、化工和环境监测以及工业和医疗应用中传感器的重要进步。它们允许描述可以集成到阵列中的越来越多的传感器。它研究通信设备不断增长的可用性和计算能力，支持所需的算法，以减少来自多个传感器的原始传感器数据，并将其转换为传感器阵列所需的信息，

以便将结果快速传输到所需点 (Yallup and Iniewski 2014)。

智能传感器可以看作一个系统：

- 在自主系统通过无线连接的情况下，通常通过标准化接口提供数字输出信号；
- 可通过地址和双向数字接口访问；
- 执行命令和逻辑功能；
- 具有综合、调整和诊断能力；
- 主要有数据存储设备，是自治设备的自给自足系统。

不仅在工业环境中，而且在人类生活的各个方面，越来越多地应用智能传感器。它们用于监测健康状况、检测病毒感染、为洗衣机选择合适的循环、监控交通、管理智能建筑物和控制制造工厂的流程。智能传感器用于从过程中收集大量的信息，从而提高运营效率和产品质量。此外，智能传感器还包括通信能力和车载诊断等功能。

212

传感器融合是传感器数据或不同来源的数据的组合，使得所得到的信息在某种意义上比在单独使用这些来源时可能更有效。在这种情况下，“更有效”一词可能意味着更准确、更完整或更可靠，或是通过将两个摄像机的二维图像结合在一起，从而形成一种新的深层信息。

近年来，一门新兴学科逐渐发展起来以解决具有共同特征的各种问题：多传感器数据融合或分布式感知。多传感器数据融合是一项技术，它解决了多种不同类型传感器的数据相结合的问题，以得出关于物理事件、活动或情况的结论。多传感器数据融合尝试组合来自多个传感器的数据，以便得出的结论不仅仅来自单个来源。

多传感器数据融合的主要优点是提高信息在协同过程中的质量，由此产生的整体超过其部分的总和，因为数据融合并不意味着协同作用。根据参考文献 (Mitchell 2007)，多传感器数据融合通过使用不同方式的传感器来增强普适系统的可用信息 (Schonefeld 2014)。

- 表示：在融合过程中或结束时获得的信息具有高于每个输入数据集的抽象级别或粒度，新的抽象级别或粒度提供比每个初始信息源更丰富的数据语义；
- 确定性：如果  $S$  是融合前的传感器数据， $p(S)$  是融合前数据的先验概率，则确定性的增益是融合后  $p(S_i)$  的增长率，如果  $S_i$  表示融合后的数据，则可以预期  $p(S_i) > p(S)$ ；
- 精确度：融合后数据的标准偏差小于源直接提供的标准偏差，如果数据被噪声或误差破坏，融合过程将试图减少噪声和误差。一般来说，精确度的增加和确定性的增益是相关的；
- 完整性：在普适计算环境中为当前的知识库带来新的信息，将会提供一个更完整的视图，一般来说，如果信息是冗余和不变的，那么精度也可能会增加。

因此，多传感器数据融合的过程可以用一个函数模型来描述，该模型定义为一组函数，它可以折衷任何数据融合系统及其之间的关系，但功能模型不是一个描述过程流程的过程模型。参考文献 (Meier 1998) 提出的多传感器融合的一般功能模型如图 5.3 所示。该模型包含执行数据融合过程所需的基本功能：数据关联、数据融合、数据抽象以及当前普适系统状态的知识表示。

213

一些作者通过将数据融合系统分为物理、信息和认知三个主要领域，来更详细地介绍多传感器数据融合系统，这会导致这些领域之间的数据流动，如图 5.4 所示。

到目前为止，已经设计了正式流程和由此产生的数据流；下一个挑战是根据集中区域情景的约束来实现多传感器数据融合系统。

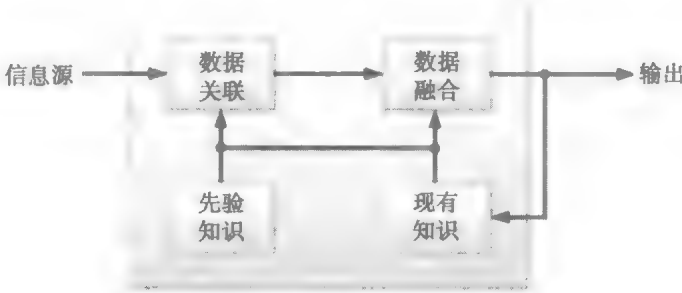


图 5.3 多传感器数据融合的功能模型

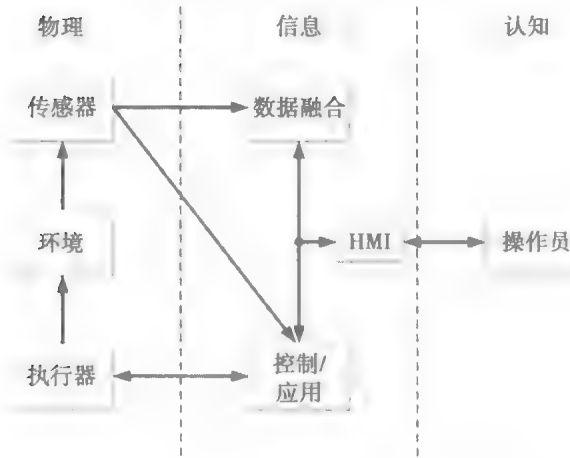


图 5.4 三个多传感器数据融合域模型

应用范围从工业应用（例如控制复杂的设备）到自动化军事制造问题（例如自动目标识别和战场演习以及威胁分析）来自不同传感器和传感器类型的数据是跨学科的，并通过某些技术连接，例如：

- 人工智能；
- 认知心理学；
- 信息理论；
- 模式识别；
- 信号处理；
- 统计。

要处理的传感器数据可以包括参数位置数据，例如角度信息（方位角、高度和图像坐标）。数据融合可以与人类使用的认知过程进行比较，从数据稳定地传达到他们的感官来得出他们的环境结论。

传感器数据是根据传感器记录到的环境数据进行分析的。例如，对朋友的识别可能需要分析诸如面部整体形状、某些视觉特征的识别、语音模式的分类和检测甚至某些类型的动作或手势等因素。

因此，数据融合应用范围广泛，包括军事应用，如监视、战术情况和威胁分析，以及非军事应用，例如自动化、遥感等。此外，可以区分直接融合、间接融合以及前两者的输出融合（http9 2015）。

- 直接融合：来自一组异构或同构传感器、软传感器或虚拟传感器的传感器数据的融合，

软件的通用名称，在其中进行多个测量；

- 间接融合：使用诸如关于环境和人类输入的先验知识等信息来源

令  $s_1$  和  $s_2$  分别表示具有噪声方差为  $\sigma_1^2$  和  $\sigma_2^2$  的两个传感器测量值。获得组合测量值  $s_3$  的一种方法是应用所谓的中心极限定理，该定理也适用于 Fraser-Potter 固定区间平滑器，如下所示：

$$s_3 = \sigma_3^2(\sigma_1^{-2}s_1 + \sigma_2^{-2}s_2)$$

其中  $\sigma_3^2 = \sigma_1^2(\sigma_1^{-2} + \sigma_2^{-2})^{-1}$  是联合估计的方差。可以看出，融合结果就是两个测量的噪声方差的加权线性组合 (http10 2015)。

在更多的量化方面，数据融合的目标是提高结论的准确性，例如状态的估计（例如，位置或声明身份）。通常，脉冲雷达具有确定从雷达天线到被观测物体的准确径向距离的能力；但是确定角度位置（即，目标的方向）的精度是有限的。相比之下，所谓的前视红外雷达可以相对精确地观察到的物体的角度位置（即，其在二维图像内的位置），而距离范围的不确定性较大。当来自两个传感器的数据融合时，目标的估计位置的不确定性小于单独测量的不确定性。因此，传感器融合结合了两个传感器的优点，改善了位置的估计，并且减少了位置的不确定性。

总之，传感器无处不在，无所不在。近十年来，MEMS 技术的进步推动了传感器的前沿研究。目前科学界正在向传感器提供全新的功能。在许多情况下，正在组织许多具有有限功率和处理能力的智能传感器来执行更具挑战性的任务。

5.4.3 控制

用于物理世界任务的控制系统必须实时执行许多复杂的信息处理任务。它通常在边界条件可能快速变化的环境中运行。为物理世界任务设计控制系统的通常方法是将底层真实世界问题分解成一系列功能单元，例如：

- 任务规划；
- 任务执行；
- 任务控制。

它们被嵌入传感器输出和执行器输入之间，这是物理世界控制系统的两个主要组件。在确定物理世界任务的计算要求之后，必须决定实际问题的主要分解，其次是二次分解，等等。

关于物理世界控制系统的要求，可以确定若干约束，例如

- 多个传感器：如果传感器在其测量的物理量上重叠，则可能导致读数不一致；
- 鲁棒性：在传感器故障的情况下，必须保证仍在努力实现物理世界控制系统的健壮行为。

这些约束可能对复杂的物理世界控制系统设计具有特定的影响，但不一定会作用于复杂的控制系统。复杂的行为可能反映了复杂的环境 (Simon 1969)。对于鲁棒性，物理世界控制系统必须在其一个或多个传感器开始失败或提供错误信息时执行，这意味着恢复必须迅速。这意味着内置的自校准必须始终进行，以避免外部校准步骤 (Brooks 1985)。

为了在物理世界控制系统中实现更多的可配置性和灵活性，已经开发了可编程控制器。硬件架构通常基于微控制器 (MC) 或现场可编程门阵列 (FPGA)。微控制器是一种包含处理器内核和外围设备的半导体芯片。在许多情况下，甚至主存储器和程序存储器部分或完全在同一个芯片上。因此，微控制器是单片计算机系统或单片系统 (SoC)。它们通常包含复杂的外围功能，例如控制器局域网 (CAN)、通用串行总线 (USB)、本地互连网络 (LIN)、串行外设

接口 (SPI)、脉宽调制 (PWM) 输出、液晶显示器 (LCD) 控制器和驱动器、模数转换器、反之亦然。一些微控制器还具有可编程数字和模拟功能模块。现场可编程门阵列 (见 2.2.2 节) 是通过使用所谓的硬件描述语言 (HDL) 来指定 FPGA 专用配置, 在制造后设计用于客户配置的集成电路。如 2.2.2 节所述, FPGA 包含可编程逻辑组件, 即所谓的逻辑块, 以及允许块连接在一起的可重构互连层次结构。逻辑块可以配置为执行特定应用程序的组合函数。在大多数 FPGA 中, 逻辑块还包括存储器元件, 它们是简单的触发器或更完整的内存块。图 5.5 展示了 FPGA 芯片的示例——赛灵思 FPGA Spartan XC3S400。

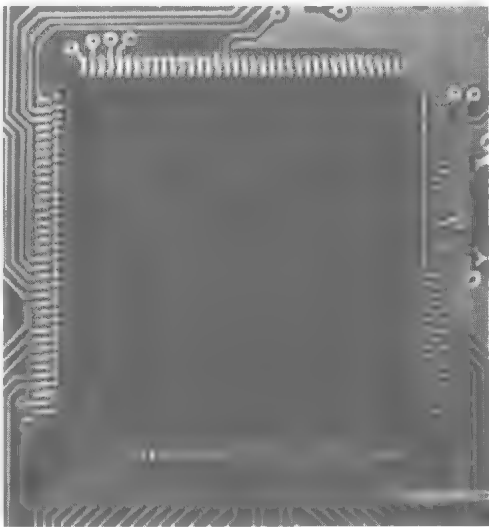


图 5.5 赛灵思 FPGA Spartan XC3S400 (http11 2015)

如 2.4 节所述, 反馈概念描述了一种控制系统, 其中系统的输出 (其动态取决于所选系统的物理世界模型) 被迫遵循参考输入, 同时对干扰的影响相对不敏感。在两个信号之间存在差异的情况下, 反馈回路的求和点产生一个误差信号, 该误差信号被传送到控制器输入端。控制器根据控制策略对误差信号进行操作, 并操纵物理世界模型使其跟踪参考输入。此外, 这种闭环反馈迫使系统输出与参考输入有关的干扰输入。所使用的简单控制器是比例或 P 型控制器、简单的积分或 I 型控制器, 以及简单的微分或 D 型控制器。更复杂的控制器是可用于普适控制系统的比例积分微分 (PID) 控制器。控制器的设计基于这样一个假设, 即控制物理世界问题存在的一些基本知识。这成为控制器设计的起点, 可以通过反馈来调节物理世界参数的不确定性。控制器中可能会出现几种不确定因素 (Poslad 2009):

- 近似计算 (例如, 一个非线性问题在其范围内的线性解);
- 环境动力学 (例如, 随机效应);
- 不准确的模型 (例如, 非确定性影响);
- 随机作用效应 (例如, 个体效应与自变量无关);
- 传感器限制 (例如, 传感器放置不当或信号接收不良)。

1. 自适应控制中的参数识别

控制不确定的物理世界任务的前提是自适应和鲁棒的控制。自适应控制方法使用一个控制器来适应被控系统的参数变化或初始不确定。因此, 需要一种适应物理世界任务的内在条件的控制法则。自适应控制的基础是参数识别。现实世界物理系统的  $p$  维向量  $\underline{\theta}_{RWPS}$  的参数的识别可以通过误差标准来表征, 确定识别模型中的参数向量  $\underline{\theta}_{IM}$  可以表示为

$$\underline{\theta}_{RWPS} = \underline{\theta}_{IM} \tag{5.1}$$

由于在计算机上实现了识别方法, 随后使用了时间连续模型的时间离散描述。对于线性动态系统和分段常数系统输入, 可以容易地从  $n$  个一阶微分方程组中推导出  $n$  个一阶差分方程的等价集的描述, 或者作为第  $n$  阶的一个差分方程, 这是用于识别目的模型输出的计算简化。需要注意的是非线性时间连续模型不是这种情况。

参数识别的常用方法有最小二乘法和梯度下降法。对于输出误差最小二乘法, 选择误差的标准是

217

218



$$J_N(\underline{\Theta}_{\text{IM}}) = \sum_{k=n}^N (\hat{v}_k(\underline{\Theta}) - \xi(v_k))^2 \rightarrow \text{Min} \quad (5.2)$$

其中  $N$  是测量的数量。定义向量

$$\underline{\hat{v}}^N(\underline{\Theta}) := [\hat{v}_n(\underline{\Theta}), \hat{v}_{n+1}(\underline{\Theta}), \dots, \hat{v}_N(\underline{\Theta})]^T \quad (5.3)$$

并且

$$\underline{\hat{v}}^N := [v_n, v_{n+1}, \dots, v_N]^T \quad (5.4)$$

根据估计值和实际的误差, 公式 (5.2) 可以改写为

$$J_N(\underline{\Theta}) = (\underline{\hat{v}}^N(\underline{\Theta}) - \xi\{\underline{v}^N\})^T (\underline{\hat{v}}^N(\underline{\Theta}) - \xi\{\underline{v}^N\}) \rightarrow \text{Min} \quad (5.5)$$

考虑一个平稳随机过程  $\{v_k\}$ , 其中  $\xi\{v_k\} = 0$ , 公式 (5.2) 和公式 (5.3) 可以简化成

$$J_N(\underline{\Theta}) = \sum_{k=n}^N \hat{v}_k^2(\underline{\Theta}) \rightarrow \text{Min} \quad (5.6)$$

和

$$J_N(\underline{\Theta}) = (\underline{\hat{v}}^N(\underline{\Theta}))^T \underline{\hat{v}}^N(\underline{\Theta}) \rightarrow \text{Min} \quad (5.7)$$

替换公式 (5.6) 中的  $\hat{v}_k(\underline{\Theta})$ , 我们可以得到最小二乘输出误差准则

$$J_N(\underline{\Theta}) = \sum_{k=n}^N (Y_{\text{Meas},k} - \hat{Y}_k(\underline{\Theta}))^2 \rightarrow \text{Min} \quad (5.8)$$

通过与  $\hat{v}_k(\underline{\Theta})$  和  $\hat{v}^N$  相同的方式定义  $\underline{Y}^N(\underline{\Theta})$  和  $\underline{Y}_{\text{Meas}}^N$ , 公式 (5.8) 可改成

$$J_N(\underline{\Theta}) = (\underline{Y}_{\text{Meas}}^N - \underline{\hat{Y}}^N(\underline{\Theta}))^T (\underline{Y}_{\text{Meas}}^N - \underline{\hat{Y}}^N(\underline{\Theta})) \rightarrow \text{Min} \quad (5.9)$$

$\underline{\hat{Y}}^N(\underline{\Theta})$  是  $\underline{Y}^N(\underline{\Theta})$  的非线性函数, 参数向量是  $(\underline{\Theta})_{\text{min}}^N$ , 其最小值  $J_N(\underline{\Theta})$  可以通过数值优化方法确定

如果假设输出误差  $\{v_k\}$  为高斯函数, 则可以为公式 (5.7) 的误差准则给出合理的解释  
因此,  $\underline{v}^N$  的概率如下所示

$$p(\underline{v}^N) \approx \exp\left[-\frac{1}{2} (\underline{v}^N - \xi\{\underline{v}^N\})^T \sum_{v=1}^{N-1} (\underline{v}^N - \xi\{\underline{v}^N\})\right] \quad (5.10)$$

考虑估计输出误差序列  $\{v_k(\underline{\Theta})\}$  作为实现输出误差的准则, 并确定  $(\underline{\Theta})$

$$p(\underline{\hat{v}}^N(\underline{\Theta})) \rightarrow \text{Max} \quad (5.11)$$

其中,  $(\underline{\Theta})$  是最大似然估计, 我们从公式 (5.10) 中发现公式 (5.11) 等价于

$$(\underline{\hat{v}}^N(\underline{\Theta}) - \xi\{\underline{v}^N\})^T \sum_{v=1}^{N-1} (\underline{\hat{v}}^N(\underline{\Theta}) - \xi\{\underline{v}^N\}) \rightarrow \text{Min} \quad (5.12)$$

假设一个白噪声过程  $\{v_k\}$

$$\text{var}(v_k) = \sigma_v^2 \quad (5.13)$$

并且

$$\sum_{v=1}^N N = \sigma_v^2 \cdot I \quad (5.14)$$

因此, 公式 (5.12) 等价于公式 (5.13), 参数估计  $(\underline{\Theta})_{\text{min}}^N$  最大限度地从期望值  $v_k$  减少了  $\{\hat{v}_k(\underline{\Theta})\}$  的距离的平方和, 成为所谓的最大似然估计。

输出误差最小二乘法准则如下:

$$\underline{e}(t_j) := \underline{Y}_{\text{MU}}(t_j) - \underline{Y}_{\text{RS}}(t_j); j = 1, \dots, k \quad (5.15)$$

以  $\underline{e}(t_j)$  作为最小化的误差函数。性能的标准是

219

220

$$J_N = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^m d_i \sum_{j=1}^k |e_i(t_j)|^q, d_i > 0 \quad (5.16)$$

通常选择  $q=2$ ，这导致输出误差的最小二乘估计。当  $q>2$  时，最大误差被最小化。通过加权系数  $d_i, i=1, \dots, m$ ，可以考虑  $Y_{MM}$  的每个组件的不同误差方差。输出  $\underline{y}$  也是参数  $\underline{p}$  的函数，公式 (5.16) 中的性能标准可以表示成

$$J_N(\underline{p}) = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^m d_i \sum_{j=1}^k |Y_{MM_i}(t_j) - \underline{Y}_{RSi}(t_j, \underline{p})|^q \quad (5.17)$$

因此，参数识别需要解决数学问题

$$J_N(\underline{p}) \stackrel{!}{=} \text{Min} \quad (5.18)$$

## 2. 鲁棒控制

鲁棒控制是控制理论的一个分支，其中控制器设计的方法明确地处理由于扰动或意外的设定点序列引起的不确定性。因此，鲁棒控制器设计的思想是控制器对物理世界控制任务的所有不确定性不敏感，控制器的最终设计具有固定的结构。那么鲁棒控制器就适合处理小的不确定性 (Yu and Lloyd 1997)。

鲁棒控制方法的目的是在存在有界误差的情况下达到鲁棒性能或稳定性。与自适应控制策略相反，鲁棒控制策略是静态的。控制器是设计用来处理某些未知但是有界的变量的，而不是为了适应测量的变化 (hup10 2015)。

关于设定点序列和干扰补偿的要求，反馈控制回路能够保持其稳定性和鲁棒性。即使受控系统的参数变化范围很大，反馈控制回路仍能保持其稳定性及其整体行为。因此，反馈控制回路相对于属性的干扰补偿和设定点序列是鲁棒的。

221

## 5.5 普适计算中的自治系统

自治或自治行为是一个术语，用来指没有外部干预的无人驾驶车。它们在执行任务时根据自己能力做出决定，或通过预先编程的决策方法来完成任务。因此，无人驾驶车是没有人坐在车上负责引导的车。无人驾驶车既可以是远程控制的，也可以是远程指导的，抑或是自动感知环境并自行驾驶的自治车。它们独立运作，无需外部干预。此外，无人机代表自治领域的日益严峻的挑战，如图 5.6 所示 (hup12 2015)。

一般来说，自治（无人驾驶）车执行具有高度自主性的行为或任务，如图 5.6 所示，这在现场车辆中尤为理想。自治机器人系统的应用包括空间探索，特别是通过无人驾驶机器人系统（如火星探路者漫游器，Sojourner）发现和探索外太空的天体结构。美国航空航天局发布任务“火星探路者”旨在演示以价格可取、高效的方式向火星表面提供着陆器和自由飞行的流动站所必需的技术。探路者不仅实现了这一目标，而且还返回了前所未有的数据量，并超出了其原始设计寿命。从登陆到 1997 年 9 月 27 日的最终数据传输，火星探路者号返回了 23 亿位信息，其中包括着陆器的 16 500 幅图像和流动站的 550 幅图像，以及 15 种岩石和土壤的化学分析以及关于风和其他天气因素的广泛数据。科学仪器对着陆器和流动站进行的调查结果表明，火星过去一度温暖湿润，水存在于其液体状态和较厚的大气层中 (hup13 2015)。在图 5.7 中，火星探路者漫游器 Sojourner 在岩石“Yogi”前面。可以在美国航空航天局/Jet Propulsion 实验室的网站上查阅这张图片 (hup13 2015)。

因此，高度自治的车辆必须在长时间内在环境的显著不确定性下表现良好，而且它们必须能够在没有外部干预的情况下补偿系统故障。因此，高度自治的控制系统为环境和控制目标的变化提供了高水平的适应行为。为了实现自治性，要求控制系统的设计应充分利用算法以控

制、识别、估计和通信任务，并且针对连续或离散状态系统和决策方法，因此人工智能是首选。在监督和调整方面，自治控制系统必须对故障提供高度的容忍度，这意味着容错系统的设计方法在自治系统设计中很重要。此外，自治控制器必须能够规划必要的控制动作顺序来完成复杂的任务。



图 5.6 无人驾驶车 - 自治的挑战



图 5.7 火星探路者漫游器 Sojourner 和岩石 “Yogi” (图片来自美国航空航天局 / Jet Propulsion 实验室 <http>13 2015)

对自治车辆的动态行为进行建模和分析的方法的需求提出了超出现有知识的重大挑战 (Antsaklis and Passino 1993)。

除了现在的空间机器人，传统的工业机器人也是自动控制、可编程的、多用途机器人，并且可以在三个或更多的自由轴上编程，现代工业机器人是其直接环境严格限制的自治系统。这些机器人的工作空间是有挑战性的，通常可能包含不可预知的变量。

一般来说，这些先进的机器人以及无人驾驶车所需的自治和容错控制需要开发和实现高级

的算法，如图 5.6 所示。这些算法允许观察自治系统行为的完整性和正确性，这是监督控制方法的一部分，每一个功能都可以独立于其余的系统来设计、实现和测试。这种监控功能的算法增加了软件实现失败的风险。因此，只有监督级别是绝对可信的，才能提高整体的可靠性。因此，Blanke 等人提出了一个七步的设计程序。得出的经验是，自治监督的设计依赖于适当的体系结构，支持明确分配不同软件任务的方法。这是设计和验证的一项关键任务。后者是至关重要的，因为在自治控制系统中测试监督功能是一项重要任务。因此，控制系统的监督功能的架构设计及其实现和验证不是一件微不足道的工作，因为架构必须适应多个功能的实现，例如 (Blanke et al. 2001)：

- 在整个过程的不同阶段支持全面协调的无人驾驶车控制；
- 在无人驾驶车的可预见故障的情况下，支持所有的常规运行和控制模式；
- 对无人驾驶车的运行状态、控制误差、过程状态和状况进行自主监控；
- 根据需要进行故障诊断、调节和重新配置，这是由状态信息自主地进行车辆范围的协调控制。

上述功能可以在具有自治控制器的监控结构中实现，并与无人驾驶车控制系统通信。因此，自治监督由意大利文字写的两个层次组成，负责故障诊断、逻辑、状态控制和激活或进行适当的补救措施的执行器：

- 具有控制回路输入和输出的低级别自治控制器；
- 具有故障诊断和故障调节器算法的自治监督级别；
- 监督逻辑的自治监督级别；
- 具有无人驾驶车控制和协调的高等级自治控制器。

224

为了促进这些挑战，国防高级研究计划局 (DARPA) 发起了网络挑战大赛，该竞赛旨在创建自动防御系统，能够对缺陷进行推理，制定补丁，并将其部署在网络上。通过在机器的速度和规模上发挥作用，这些技术也许有一天会推翻今天的攻击者占主导地位的现状。正如在 2004 年 DARPA 挑战大赛期间首次采用的第一台自主地面车辆最初并没有准备好驶入高速公路时，第一代自动化网络防御系统将无法与专家分析师进行有意义的竞争或防卫网络（见第 3 章）。网络大挑战赛的目标是将这些突破性的原型设计为自己的联盟，让它们能够相互竞争以定制防卫网络的软件。DARPA 计划在当今精英网络安全竞赛中模拟比赛。该计划设想了许多未来的好处，包括：

- 在企业规模的机器速度下进行专家级软件安全分析和修复；
- 建立持久竞争社区进行自动网络防御；
- 为网络安全的未来确定思想领袖；
- 创建一个公开、高保真的自动系统实时竞争记录。

选手将从限定性事件开始一系列挑战，其中自动分析软件集合。选手将通过识别、证明和修复软件缺陷获得资格。在排位赛期间表现最佳的一批选手将被邀请参加 2016 年中期的网络大挑战赛决赛。每个团队将自动识别软件缺陷、扫描网络以识别受影响的主机。团队将根据系统能够保护主机、扫描网络的漏洞以及维护软件的正确功能的能力进行相互打分。实现这一愿景将需要在各种学科中取得突破性的进展，包括应用计算机安全、程序分析和数据可视化。

5.6 案例研究：机器人操纵器

作为一个系统的机器人由以下元素组成，它们集成在一起形成一个整体

225

- 操纵器：机器人的主体由机器人的连杆、关节和其他结构部件组成，对于其他部件，

单独的操纵器不是机器人；

- 末端执行器：连接到操纵器的最后一个关节，它通常处理对象，与其他机器连接，或执行所需的任务；
- 执行器：伺服电机、步进电机、气缸和液压缸 其他执行器类型用于更具体的应用；
- 传感器：收集有关机器人内部状态的信息或与外部环境通信的信息；
- 控制器：控制机器人操纵器的动作，它接收来自嵌入式计算系统的数据，控制执行器的动作，并将动作与感官反馈信息相协调。

因此，机器人操纵器系统是能够识别其自身状态并在此基础上做出动作的装置。它由连接在开放运动链上的刚体连接链组成。如图 5.8 所示，可以分解机器人操纵器使其由旋转接头、主体和负载组成。操纵器系统可以具有多达 6 个运动自由度。这包括三个平移运动，例如上下移动、左右移动、向前和向后移动。它还包括三个旋转自由度：上下倾斜、左右转动、左右倾斜。

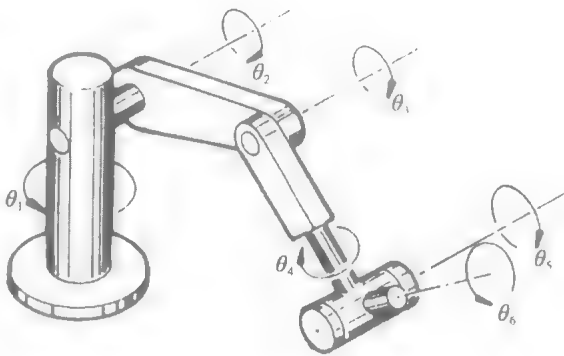


图 5.8 机器人操纵器示意图

主体成分描述主体的质量和惯性效应。机器人的关节由轴给出。轴是描述驱动关节、控制系统和基准生成的马达和变速箱的关键部件。图 5.9 给出了机器人操纵器的可能的抽象层，其中包含了轴 qddRef 参考加速度作为连接器的输入值和机械式驱动轴输出端连接器



图 5.9 图 5.8 中机器人操纵器的轴的组成图（详见正文）

226

轴的分解表明，参考加速度（qddRef）将被积分两次，以便导出参考速度（qdRef）和参考位置（qRef）。参考值被送到控制器（irControl），而控制器输出的是驱动齿轮箱（irGear）的电机（irMotor）的参考电流。齿轮箱的驱动部分是一个机械法兰，轴和机器人关节的轴可以连接在一起。

典型的轴控制器（irControl）是速度和位置控制器，其输出是电机所需的参考电流。电动机的电流与所产生的电机转矩和被控制的量成比例。电机的 irMotor 模型由可以使用运算放大器实现的模拟电流控制器和具有组件  $R_a$ 、 $L_a$  和 EMF 的直流电机组成。电流控制器的输出电流代表电机的输入信号。直流电机产生驱动机械法兰的扭矩。

驱动系统的齿轮箱 irGear 的组成图由以下几部分组成：电机惯性、用于建模齿轮弹性的旋转弹簧、代表齿轮比的理想齿轮箱和用于模拟驱动侧齿轮的转动惯量的负载惯性。在电机轴和轴承之间连接的摩擦元件模拟轴承的库仑摩擦。

为了描述如何对组件的细节进行建模，我们可以考虑一个简单的电机驱动系统，如图 5.10 所示。该系统可以由一组相互连接的部件组成：控制器、电机、齿轮箱和负载。



图 5.10 机器人操纵器电机驱动示意图

图 5.10 中的模型是一个复合模型，它以组件和组件之间的连接方式来指定要建模的机器人操纵系统的拓扑结构。例如，语句齿轮箱（ $n = 100$ ）声明类齿轮箱的组件变速箱，并将默认比率  $n$  设置为 100。图 5.8 所示的机器人操纵器系统的完整模型可以使用 Modelica 语言描述，如图 5.11 所示。

图 5.10 中的连接指定了几个组件之间的相互作用，如图 5.9 所示。连接器包含描述交互所需的所有数量。

如图 5.11 所示，电机驱动的 Modelica 模型代表一个典型的反馈回路，可以使用计算机代数作为有效的模拟代码来计算连续时间传递函数。一个连续时间传递函数的 Modelica 模型如下：

```
partial block SISO
  input Real u;
  output Real y;
end SISO;

block TransferFunction
  extends SISO;
  parameter Real a[:]={1,1} "Denominator";
  parameter Real b[:]={1} "Numerator";
protected
  constant Integer na=size (a,1);
  constant Integer nb(max=na)=size (b,1);
  constant Integer na=na-1 "System order";
  Real b0[na]=cat (1, b, zeros (na -nb)) "Zero expanded vector";
  Real x[n] "State vector";
Equation
  //Controllable canonical form
  der (x[2:n])=x[1:n-1];
  a[na]·der (x[1]+a[1:n]·x=u;
  y=(b=[1:n]-b0[na]/a[na]·a[1:n])·x+b0[na]/a[na]·u
end TransferFunction;
```

除了用于仿真目的的上述机器人操纵器电动机驱动系统的 Modelica 模型之外，可以根据数学上的比例积分（PI）控制器设计的需要导出机器人操纵器传递函数。针对理想的连续 PI 控制器可编程接口控制器（PIC）描述了 PI 算法，如下所示：

$$PIC = K_p \cdot e(t) + \frac{K_i}{T_i} \int e(t) dt \tag{5.19}$$

其中 PIC 是 PI 控制器输出信号； $e(t)$  是电流控制器的误差，定义为  $w - w_d$ ； $w$  是输入变量（设定值）； $w_d$  是测量控制变量； $K_p$  是 P 控制器增益，一个调谐参数； $K_i$  是 I 控制器增益，一个调谐参数； $T_i$  是复位时间，一个调谐参数。

公式 (5.19) 中等号右端的前两项称为 P 控制器部分；公式 (5.19) 中的最后一项是控制器的组成部分。其功能是随着时间的推移整合控制器误差  $e(t)$ 。其中，复位时间调节参

```
model MotorDrive of Robotic Manipulator
  PI controller;
  Motor motor;
  Gearbox gearbox (n=100);
  Shaft J1 (J=10);
  Tachometer wl;
equation
  connect(controller.out, motor.inp);
  connect(motor.flange, gear box.a);
  connect(gearbox .b, J1.a);
  connect(J1.b, wl.a);
  connect(wl.w, controller.inp);
end MotorDrive;
```

图 5.11 图 5.10 电机驱动系统的 Modelica 模型

227

228

数  $T_i$ ;

- 为积分项提供单独的权重,使得可以独立调整积分作用的影响;
- 在分母中,较小的值提供更大的积分项的权重。

当只有一个 P 控制器时,公式 (5.19) 将变成:

$$PC = K_p \cdot e(t)$$

在上述 P 控制器方程中进行加法或减法的唯一途径是使  $e(t)$  不为零。如果  $e(t)$  不稳定在零,则  $w_d$  将不等于  $w$  和偏移结果。为了避免机器人操纵器系统的控制器偏移,使用 PI 控制器,其方程如公式 (5.19) 所示。从公式 (5.19) 可以看出,在响应时间完成后,误差的积分和可以具有最终值或剩余值。这很重要,因为这意味着  $e(t)$  可以为零。然而,仍然可以添加或减少某些参数来接收最终 PIC 的输出。只要有任何误差,即  $e(t)$  不为零,积分项将会增长或缩小,这对 PIC 会产生反作用。当  $w_d$  等于  $w$ ,并且  $e(t) = 0$  时,持续一段时间后,PI 的变化就会停止。此时,积分项可以有剩余值。来自集成的剩余值创建了一个新的整体偏置值,这对应于新的操作级别。因此,积分操作会持续复位偏置值,以消除当操作电平改变时的偏移量。因此,采用比例积分控制算法的挑战是:

- 调谐参数相互影响,其影响必须由设计者平衡;
- 积分项趋向于增加过程响应的振荡或滚动行为。

虽然调谐参数彼此相互作用,但实现最佳调谐值是具有挑战性的。可以按照以下四个步骤实现机器人操纵器的比例积分控制器 (Cooper 2008)。

(1) 确定  $w$  和  $w_d$  的操作设计水平 (DLO);

(2) 收集关于 PIC 的 DLO 周围的过程数据 ( $w$  和  $w_d$  在设计操作水平附近稳定),并应用测试信号强制 PIC 产生确切的响应;

(3) 通过拟合近似一阶时间 (FOT) 模型来描述过程动态,以测试从步骤 2 获得的数据,模型参数为过程增益  $K_p$ 、 $K_i$  和复位时间  $T_i$ ;

(4) 使用 FOT 参数完成机器人操纵器比例积分 (PI) 控制器的设计,基于公式 (5.19) 中 PI 控制器算法的理想形式。对于复位时间,可以通过识别机器人操纵器的 PI 控制器的最佳拟合来研究不同的响应控制器的行为。在快速响应控制器的情况下,当  $w_d$  稳定时,可以容忍一些过冲和振荡,这意味着  $T_i$  应该很小,并导致所谓的积极调整或积极响应。在慢速控制器的情况下,将误差向正确的方向移动,但很缓慢,将为机器人操纵器控制器选择所谓的保守调整或保守的响应。与上述两种调谐类型相反,第三种类型 (即控制器的适度调整) 将在合理地快速移动  $w_d$  的同时,产生很少或没有超调,这称为机器人操纵器控制器的适度调整或中等响应。

自然直接作用的过程需要反向作用以保持稳定的控制器。尽管直接作用过程和反向作用控制,增益因子  $K_p$  和  $K_i$  应具有正值。在大多数商业控制器中,仅使用正  $K_i$  值。然后通过指定控制器是反向作用或直接作用,以分别表示正或负  $K_i$  来分配控制器的符号。PI 控制器对机器人操纵器作用序列中的变化作出反应的能力导致攻击性控制器类型处于更高能量的 PIC 动作中,从而导致更积极的  $w_d$  响应。这导致机器人测序过程响应中的一些过冲和振荡,而适度响应可能更适合于机器人测序过程的响应。

### 5.7 练习

1. 术语普适计算是什么意思?

2. 列出并定义普适计算的主要特征
3. 术语智能设备是什么意思?

4. 举出智能设备的例子

229

230

5. 术语普适网络是什么意思?
6. 列出并定义普适网络的主要特征。
7. 术语智能环境是什么意思?
8. 举一个智能环境的例子。
9. 术语以人为本的环境是什么意思?
10. 举一个以人为本的环境的例子。
11. 术语分布式计算环境是什么意思?
12. 举一个分布式计算环境的例子。
13. 智能微尘一词是什么意思?
14. 举一个智能微尘的例子。
15. 术语 MEMS 是什么意思?
16. 举一个 MEMS 的例子。
17. 术语普适学习空间是什么意思?
18. 举一个普适学习空间的例子。
19. 智能家居一词是什么意思?
20. 在智能家居应用程序中提供电力线通信的示例。
21. 术语 Web 服务描述语言是什么意思?
22. 列出并定义 Web 服务描述语言的主要特性。
23. 术语标签是什么意思?
24. 举一个标签的例子。
25. 术语传感是什么意思?
26. 举一个传感的例子。
27. 术语 MARG 传感器是什么意思?
28. 列出并定义 MARG 传感器的主要特性。
29. 术语传感器融合是什么意思?
30. 举一个传感器融合的例子。
31. 术语多传感器数据融合是什么意思?
32. 举一个多传感器数据融合的例子。
33. 术语人工智能是什么意思?
34. 举一个人工智能的例子。
35. 控制一词是什么意思?
36. 列出并定义控制的主要特点。
37. 术语参数识别是什么意思?
38. 举一个参数识别的例子。
39. 术语鲁棒控制是什么意思?
40. 举一个鲁棒控制的例子。
41. 术语自治系统是什么意思?
42. 举一个无人自治系统的例子。
43. 术语容错是什么意思?
44. 列出并定义容错的主要特征。
45. 术语机器人操纵器是什么意思?
46. 列出并定义机器人操纵器的主要特征。
47. 术语机器人的自由度是什么意思?
48. 列出并定义机器人自由度的主要特征。
49. 术语机器人工作区的含义是什么?
50. 列出并定义机器人工作区的主要特征。

[231]

## 参考文献

- (Antsaklis and Passino 1993) Antsaklis, P. J., Passino, K. M. (Ed.): An Introduction to intelligent and autonomous control, Kluwer Academic Publ. 1993
- (Bardram and Friday 2010) Bardram, J., Friday, A.: Chapter 2: Ubiquitous Computing Systems, pp. 37–94, In: Krumm, J.: Ubiquitous Computing Fundamentals, CRC Press, 2010
- (Blanke et al. 2001) Blanke, M., Frei, C., Kraus, F., Patton, R. J., Staroswiecki, M.: Fault-tolerant Control Systems. Chapter 8, In: Control of Complex Systems. Åström, K., Albertos, P., Blanke, M., Isidori, A., Schaufelberger, W., Sanz, R. (Eds.), Springer Publ. 2001
- (Brooks 1985) Brooks, R. A.: A Robust Layered Control System for a Mobile Robot. MIT A. I. Memo 864, 1985
- (Brush 2010) Brush, A. J. B.: Ubiquitous Computing Field Studies. In: Ubiquitous Computing Fundamentals, pp.161–202, CRC Press, 2006
- (Buckley 2013) Buckley, A.: Organic Light Emitting Diodes (OLED): Materials, Devices, and Applications, Elsevier B.V.
- (Bumiller et al. 2010) Bumiller, G., Lample, L., Hrasnica, H.: Power line communication network for large scale control and automation systems, IEEE Communications Magazine, Vol. 48(4), pp. 106.113, 2010
- (Camp 2000) Camp, P. J.: Supporting Communication and Collaboration Practices in Safety-Critical Situations. Proceed. Human Factors in Computing Systems
- (Carcelle 2006) Carcelle, X.: Power Line Communications in Practice. Artech House Publ. 2006
- (Cooper 2008) Cooper, D. J.: PI Disturbance Rejection Of The Gravity Drained Tanks. Source: <http://www.controlguru.com/2006/p111806.html>
- (Coulouris et al. 2005) Coulouris, G., Dollimore, J., Kindberg, J.: Distributed Systems: Concepts and Design. Addison-Wesley, Reading, MA, 2005
- (CPSSR 2008) Cyber-Physical Systems Summit Report, <http://varma.ece.cmu.edu/summit/>, 2008
- (Davy 2015) Davy, A.: Components of a smart device and smart device interactions. [http://www.m-zones.org/deliverables/d234\\_1/papers/davy-components-of-a-smart-device.pdf](http://www.m-zones.org/deliverables/d234_1/papers/davy-components-of-a-smart-device.pdf)



- (Gann et al. 1999) Gann, D., Barlow, J., Venables, T.: Digital Futures Making Homes Smarter. Joseph Rowntree Foundation. Published by Chartered Institute of Housing, 1999
- (Gaver et al. 2006) Gaver, W. W., Bowers, J., Boucher, A., Law, A., Pennington, S., Villar, N.: The History Tablecloth: Illuminating domestic activity. In: *Proceed. Designing Interactive Systems: Processes, Practices, Methods, and Techniques*, pp.199–208, DIS Press, 2006
- (Gaver et al. 2007) Gaver, W.W., Sengers, P., Kerridge, T., Kaye, J. J., Bowers, J.: Enhancing ubiquitous computing with user interpretation: Field testing the home health horoscope. In: *Proceed. ACM CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 537–546, ACM Press, 2007
- (Goldstein et al. 2005) Goldstein, S. C., Campbell, J. D., Mowry, T. C.: Programmable matter, *Computer*, Vol. 38, No. 6, pp. 99–101, 2005
- (Gunstone 2011) Gunstone, R. E.: Formalisms for Use Cases in Ubiquitous Computing. In: *Proceed. Internat. Conf. on Mobile Services, Resources, and Users*, pp. 103–107, IARIA Press, 2011
- (Hum 2001) Hum, A. P. J.: Fabric area network - A new wireless communications infrastructure to enable ubiquitous networking and sensing on intelligent clothes. *Computer Networks*, Vol. 35, pp.391–399, 2001
- (Jones and Jo 2004) Jones, V., Jo, J. H.: Ubiquitous learning environment: A adaptive teaching system using ubiquitous technology. In: *Proceedings of the 21st ASCILITE Conference*, pp. 468–474, 2004
- (Kaplantzis and Sekercioglu 2012) Kaplantzis, S., Sekercioglu, Y. A.: Security and Smart Metering, In: *Proceed. European Wireless, Poland*, 2012
- (Kobãa and Andersson 2008) Kobãa, A., and Andersson, B.: A Vision of Cyber-Physical Internet. In: 2008 I.E. International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing
- (Krumm 2009) Krumm, J.: *Ubiquitous Computing Fundamentals*, CRC Press, 2009
- (Langheinrich, 2010) Langheinrich, M.: Privacy in Ubiquitous Computing, Chapter 3. In: *Ubiquitous Computing Fundamentals*, Krumm, J. (Ed.), CRC Press, 2010
- (Lee et al. 1998) Lee, W. J., Cha, S. D., Kwon, Y. R. : Integration and Analysis of Use Cases Using Modular Petri Nets in Requirements Engineering. *IEEE Transaction on Software Engineering*, Vol. 24, pp. 1115–1130, 1998
- (Lyytinen and Yoo 2002) Lyytinen K., Yoo, Y.: Issues and Challenges in Ubiquitous Computing. 2002, <http://info.cwru.edu/ubicom/document/acm.pdf>
- (Mattern 2001) Mattern, F.: The Vision and Technical Foundations of Ubiquitous Computing. *Upgrade*, Vol. 2, No. 5, pp. 1–4, 2001
- (Meier 1998) Meier, C.: Datenfusionsverfahren für die automatische Erfassung des Rollverkehrs auf Flughäfen. PhD Thesis TU Braunschweig, 1998
- (Mitchell 2007) Mitchell, H. B.: *Multi Sensor Data Fusion – An Introduction*. Springer Publ., 2007
- (Mobashsher et al. 2011) Mobashsher, A. T., Islam, M. T., Misran, N.: RFID Technology: Perspectives and Technical Considerations of Microstrip Antennas for Multi-Band RFID Reader Operation, In: *Current Trends and Challenges in RFID*, Turcu, C. (Ed.), ISBN: 978-953-307-356-9, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/current-trends-and-challenges-in-rfid/rfid-technologyperspectives-and-technical-considerations-of-microstrip-antennas-for-multi-band-rfid>
- (Moeller 2004) Moeller, D. P. F.: *Mathematical and Computational Modeling and Simulation – Fundamentals and Case Studies*. Springer Publ. 2004
- (Moeller et al. 2013) Moeller, D. P. F., Haas, R., Vakilzadian, H. : Ubiquitous Learning: Teaching Modeling and Simulation (M&S) with Technology. In: *Proceedings Summer Simulation Multiconference GCMS 2013*, pp. 125–132. Eds. H. Vakilzadain, R. Crosbie, R. Huntsinger, K. Cooper, Curran Publ. Red Hook, NY, 2013 Best Paper Award
- (Moeller and Vakilzadian 2014) Moeller, D. P. F., Vakilzadian, H.: Ubiquitous Networks: Power Line Communication and Internet of Things in Smart Home Environments. In: *Proceed. IEEE International Conference on Electro Information Technology*, pp. 596–601, DOI:10.1109/EIT.2014.6871832, IEEE Conference Publications, 2014
- (Ogata and Yano 2012) Ogata, H., Yano, Y.: Context-aware Support for Computer-Supported Ubiquitous Learning, 2012  
[http://140.115.126.240/mediawiki/images/e/e9/Context\\_Awareness.pdf](http://140.115.126.240/mediawiki/images/e/e9/Context_Awareness.pdf); Accessed: 07042013
- (Poslad 2009) Poslad, S.: *Ubiquitous Computing: Smart Devices, Environments and Interactions*. John Wiley & Sons, 2009
- (Quigley 2010) Quigley, A.: From GUI to UUI: Interfaces for Ubiquitous Computing. Chapter 6. In: *Ubiquitous Computing Fundamentals*, Krumm, J. (Ed.), CRC Press, 2010

- (Schönefeld 2014) Schönefeld J.: Architectures for Embedded Multimodal Sensor Data Fusion Systems in the Robotics- and Airport Traffic Surveillance. PhD Thesis, TU Clausthal, 2014
- (Sharples et al. 2005) Sharples, M., Taylor, J., Vavoula, G.: Towards a Theory of Mobile Learning. 2005. [http://www.mlearn.org/mlearn2005/CD/papers/Sharples %20Theory%20of%20Mobile.pdf](http://www.mlearn.org/mlearn2005/CD/papers/Sharples%20Theory%20of%20Mobile.pdf); Accessed: 07.04.2013
- (Simmon et al. 2013) Simmon, E., Kim, K-S., Subrahmanian, E., Lee, R., de Vaulx, F., Murakami, Y., Zettsu, K.: A Vision of Cyber-Physical Cloud Computing for Smart Networked Systems, NISTIR 7951 Report, 2013
- (Simon 1969) Simon. H. A.: Sciences of the Artificial. MIT Press 1969
- (Snowdon 2009) Snowdon, J. L.: IBM Smarter Energy Management Systems for Intelligent Building, Report IBM T.J. Watson Research Center, 2009
- (Varshavsky and Patel 2010) Varshavsky, A., Patel, S.: Location in Ubiquitous Computing, Chapter 7, In: Ubiquitous Computing Fundamentals, Krumm, J. (Ed.), CRC Press, 2010
- (Waggoner and Craighead 2007) Waggoner, P. S., Craighead, H. G.: Micro- and nanomechanical sensors for environmental, chemical, and biological detection. In: Lab Chip Vol. 7, pp. 1238–1255, 2007
- (Wang et al. 2007) Wang, H. H., Wang, G., Shu, Y.: Design of RFID reader using multi-antenna with difference spatial location. In: Proceedings if the WiCom International Conference, pp. 2070–2073, 2007
- (Weiser 1991) Weiser, M.: The Computer for the 21st Century, In: Scientific American, pp. 94–100, 1991
- (Weiser 1993a) Weiser, M.: Hot Topics: Ubiquitous Computing, In: IEEE Computer, 1993
- (Weiser 1993b) Weiser, M.: Some Computer Science Problems in Ubiquitous Computing, In: Communications of the ACM, 1993, Reprinted as Ubiquitous Computing, Nikkei Electronics, pp. 137–143, 1993
- (Weiser 1994) Weiser, M.: The world is not a desktop, In: Interactions, pp.7–8, 1994
- (Xia and Ma 2013) Xia, F., and Ma, J.: Building Smart Communities with Cyber-Physical Systems. In: 13th ACM International Conference on Ubiquitous Computing Symposium on Social and Community Intelligence, Beijing, China, pp: 1–6, September 2011
- (Xia et al. 2008) Xia, F., Ma, L., Dong, J., and Sun, Y.: Network QoS Management in Cyber-Physical Systems. In Proc. ICSS 2008, pp. 302–307, IEEE Press, 2008
- (Yallup and Iniewski 2014) Yallup, K., Iniewski, K.: Technologies for Smart Sensors and Sensor Fusion, CRC Press, 2014
- (Yu and Lioys 1997) Yu, H., Llooyd, S.: Variable structure adaptive control of robot manipulators. In: IEE Proceed. IEE Processes and Control Theory and Applications, Vol. 144, pp. 167–176, 1997

## 链接

- (http1 2015) [http://en.wikipedia.org/wiki/Smart\\_device](http://en.wikipedia.org/wiki/Smart_device); accessed February 16th 2015
- (Http2 2015) <http://en.wikipedia.org/wiki/Smartdust>; accessed February 16th 2015
- (http3 2015) <https://ahdictionary.com/>; accessed February 16th 2015
- (http4 2015) <http://www.independent.co.uk/life-style/gadgets-andtech/news/there-are-officially-more-mobile-devices-than-people-in-the-world-9780518.html>
- (http5 2015) <https://video.tu-clausthal.de/videos/iasor/vorlesung/iot-ss2013/20130621/iot-20130621.html>
- (http5 2015) [http://en.wikipedia.org/wiki/Smart\\_device](http://en.wikipedia.org/wiki/Smart_device); accessed February 16th 2015
- (http6 2015) [smarttechpk.blogspot.com](http://smarttechpk.blogspot.com); accessed February 16th 2015
- (http7 2015) <http://www.harlandsimon.com>; accessed February 16th 2015
- (http8 2015) <http://en.wikipedia.org/wiki/Sensor>; accessed February 16th 2015
- (http9 2015) [http://en.wikipedia.org/wiki/Sensor\\_fusion](http://en.wikipedia.org/wiki/Sensor_fusion); accessed February 16th 2015
- (http10 2015) [http://en.wikipedia.org/wiki/Robust\\_control](http://en.wikipedia.org/wiki/Robust_control); accessed February 16th 2015
- (http11 2015) [http://en.wikipedia.org/wiki/Field-programmable\\_gate\\_array](http://en.wikipedia.org/wiki/Field-programmable_gate_array); accessed February 16th 2015
- (http12 2015) [http://www.darpa.mil/Our\\_Work/I2O/Programs/Cyber\\_Grand\\_Challenge\\_%28CGC%29.aspx](http://www.darpa.mil/Our_Work/I2O/Programs/Cyber_Grand_Challenge_%28CGC%29.aspx); accessed February 16th 2015
- (http13 2015) [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/mars-pathfinder/](http://www.nasa.gov/mission_pages/mars-pathfinder/); accessed February 16th 2015

## 系统和软件工程

本章首先在 6.1 节中简单介绍系统工程，将系统工程描述为跨学科的工程领域，主要介绍了如何在其生命周期内成功设计、实施、评估和管理复杂的工程系统，同时还介绍了国际标准化组织（ISO）和国际电工委员会（IEC）的 ISO/IEC 15288:2008 标准。6.2 节描述了信息物理系统（CPS）的设计挑战及其对系统工程的影响，参考需求定义并且使用 Cradle 管理。Cradle 是一个需求管理和系统工程工具，可将整个项目生命周期整合到一个可扩展、多功能和多用户的软件产品中。6.3 节介绍了软件工程的主要概念，特别是 V 模型和敏捷软件开发方法。6.4 节介绍了 CPS 软件设计中的不同需求，它还包括软件需求标准 ANSI/IEEE29148-2011。6.5 节提供了一个海域案例研究，重点是跟踪和监测港口和船上的集装箱，以及跟踪和监测从海港口到无水港运输的集装箱。6.6 节包含了系统工程专题介绍的综合问题，最后是参考资料和进一步阅读的建议。

### 6.1 系统工程简介

如第 1 章所述，系统可以理解为一组相互关联的组件，其以有组织的形式彼此交互以达到共同目的。因此，一个系统是一个不能分为独立部分而不失去其本质特征的单元，这意味着系统的本质特征是其部件相互作用的产物，而不是单个部件的作用。因此，系统提供了满足既定需求或目标的操作能力。这意味着系统是通过在其操作环境中运行的资源的组合来完全定义的，以便实现所请求的属性。在物理意义上，术语系统可以与产品一词同义，也就是说在设计项目时，系统或产品将在最后交付。然而，一个系统通常由若干个产品组成。根据 ANSI/电子工业联盟（ANSI/EIA）632 标准中的定义（见 6.1.2 节），系统由运行端和可用产品组成。

工程是应用科学、经济、社会和实践知识来发明、设计、建立、维护、研究和改进结构、机器、设备、系统、材料和过程。因此，工程可以非常广泛，包括化学工程、土木工程、控制工程、电气和计算机工程、机械工程等广泛的专业领域。这些领域中的每一个都强调了应用科学技术和应用类型的特定领域。在这种背景下，工程师利用他们的经济学、逻辑学、数学、科学等知识，以及适当的经验或隐性知识，在设计系统或产品时找到合适的解决方案。

为工程中的问题建立适当的数学模型，可以对其进行分析，并通过模拟方法测试潜在的解决方案。因此，模型是 CPS 发展的重要一步。使用模型进行工作有几个优点，这可以在 CPS 设计过程中看到，包括基于模型的设计和模型驱动的设计方法（Derler et al. 2011）。模型还允许在安全环境中对设计进行测试，使工程师能够确定是否存在任何设计缺陷，这在开发 CPS 原型之前是非常有益的。建模 CPS 需要包括物理过程和软件模型、计算平台及网络（Johnson et al. 2014）。为此，在工程中的问题解决周期的概念分析阶段中使用模拟方法，这是一个强烈依赖于应用程序类型和规划问题的交互式过程。因此，如参考文献（Baker 2015）所述，包含功能模型分析的基于模型的系统工程过程是一种主要关注其生命周期中的工程系统的方法。这需要针对系统和产品的需求定义和管理活动，可以使用 Cradle 软件来实现（CRADLE-7 2014）。

正如前面提到的，系统工程是一种跨学科的方法，它基于一定的思维模式和基本原则来设计复杂的技术系统。因此，系统工程是学科的集合，因为一个复杂的技术系统很难仅由一个学

科设计就确保考虑并整合了设计中 CPS 的所有可能方面。系统工程与许多学科有交叉，例如：

- 控制工程；
- 电气工程；
- 软件工程；
- 项目管理。

[236]

系统工程方法深入了解如何将工程概念和程序应用于 CPS 的个人或特殊要求。这最终导致系统工程的广泛定义，每个定义都有微妙的不同，因为它倾向于反映其来源的特定焦点。以下是相关标准和文件（Faulconbridge and Ryan 2014）中广为接受和权威的系统工程定义：

系统工程是一种管理功能，用于控制整个系统的开发工作，以实现所有系统元素的最佳平衡。这是一个将操作需求转化为系统参数描述的过程，并集成了这些参数以优化整个系统的有效性（DSMC 1990）。

一种跨学科的协作方法，用以推导、发展和验证满足客户期望并被公众接受的生命周期平衡解决方案（IEEE-STD-1220-1994 1995）。

一个跨学科的方法，包括整个技术成果，以发展和验证满足客户需求的集成的和生命周期平衡的系统、产品和流程解决方案。系统工程包括：与系统产品和流程的开发、制造、验证、部署、操作、支持、处置以及用户培训有关的技术工作；系统配置的定义和管理；将系统定义转化为工作分解结构，以及开发管理决策信息（EIA/IS-632-1998 1994）。

系统工程是选择性地应用科学和工程方面的成果：将操作需求转化为根据有效措施最能满足操作需要的系统配置描述；整合相关技术参数，以优化整个系统定义和设计的方式，确保所有物理、功能和技术程序接口的兼容性；将所有工程学科的工作纳入总体工程实践中（SEC-MM-95-01 1995）。

系统工程是解决复杂系统问题并满足利益相关者要求的跨学科综合方法（Lake 1996）。

系统工程是一种跨学科的方法和手段，能够实现成功的系统。它们重于在开发周期早期定义客户需求和所需功能，记录需求，然后进行综合设计和系统验证，同时考虑到完整的问题：操作、成本和进度、性能、培训和支持、测试、制造和处置。系统工程考虑到所有客户的业务和技术需求，目标是提供满足用户需求的优质产品（Haskins 2010）。

有趣的是，上述定义主要来自早期的标准。诸如 SITEC 15288（见 6.1.1 节）、ANSI/EIA-632（见 6.1.2 节）和 IEEE-STD-1220（见 6.1.2 节）的系统工程标准不包含任何系统工程的定义，而更一般地指工程系统（Faulconbridge and Ryan 2014）。

[237]

随着更大和更复杂的工程系统的应用，模拟被用于各个步骤，作为基于概念分析和综合的系统工程的常规问题解决周期的一部分，其涉及

- 对应用程序的说明：
  - 问题定义；
  - 制定目标；
  - 情况分析；
  - 可选的测试或实验设计。
- 建模：
  - 数据采集；
  - 模型设计；
  - 验证模型实现；
  - 验证模型结果。

- 模拟：
  - 参数变化；
  - 参数优化；
  - 输出解释。
- 推荐的解决方案，包括文档和实现。

CPS 与物理世界的密切互动表明可以使用基于事件的方法在模拟中处理时间和其他约束。CPS 中的基于事件的建模方法使用事件作为系统中计算、通信和控制的单位。CPS 基本上由一组分布式的适当的系统组件组成，例如传感器用来检测事件，执行器用来指派动作的基本性能，以及其他在各自的参考框架中操作的组件。基于事件的 CPS 模型目前尚不存在一个共同的参考框架，因为其大多数是异构的 (Johnson et al. 2014)。

CPS 的另一个优点是输出和输入的实时交互。这使得 CPS 可以在不断变化的环境条件下与传感、驱动能力以及信息处理相结合。假设控制回路指示整个系统物理部分的环境条件发生显著变化。最初，这些信息已经被感测、预处理和后处理，然后作为执行器分配转移，以在特定时间段内采取行动，以正确的方式实时影响改变的环境条件。为了保证上述适当的影响和性能，需要以下过程作为系统工程的一部分：

- 需求工程（见 3.3.1 节、6.2.1 节和 6.2.2 节）；
- 可靠性分析；
- 协调来自不同学科的设计团队；
- 评估；
- 可维护性；
- 测试。

238

表 6.1 系统工程作为学科起源的重要时间点

日 期	项 目
1937	英国多学科小组分析了防空体系
1939 ~ 1945	贝尔实验室支持 NIKE 开发
1951 ~ 1980	麻省理工学院定义和管理 SAGE 防空系统
1956	RAND 公司发明了系统分析
1962	出版了《A Methodology for Systems Engineering》
1962	Jay Forrester 对麻省理工学院的城​​市系统建模
1994	Perry 备忘录敦促军事承包商采用商业惯例，例如 IEEE
2002	发布了 ISO/IEC 15588

来源：Systems Engineeriy Handbook, A Guide for System Life Cycle Processes and Activities, edited by Cecilia Haskins, 2007, INCOSE Systems Engineering Handbook, version 3.1

需求定义和管理是 CPS 设计项目成功的基础，也是早期系统工作的重点。一旦收集了需求，系统工程过程就着重于从系统层面到最低组成部分的这些需求的推导和分解（有时称为需求分解）。此过程涉及需求的获取、分析、定义、验证和管理。需求工程确保采用严格的方法来收集系统工程设计过程中所涉及的利益相关方的一整套明确的要求 (Faulconbridge and Ryan 2014)。基于 Cadle 软件工具的 CPS 设计的需求定义和管理过程详见 6.2.1 节。

系统工程的起源可以追溯到 20 世纪 30 年代，其他的项目和支持者紧随其后。表 6.1 (Haskins 2006) 总结了系统工程应用的起源和历史中的一些重要的时间点。

6.1.1 系统工程标准 ISO / IEC 15288

随着 2002 年发布了 ISO / IEC 15288 标准，系统工程工作过程中涉及流程和生命周期阶段  
的国际标准被正式确认为建立企业之间对系统、产品和服务的交易协议的首选机制。ISO/IEC  
15288: 2002 标准的初步规划始于 1994 年，当时需要一个共同的系统工程过程框架。2004 年，  
该标准被采纳为 IEEE 15288。ISO/IEC 15288 标准于 2008 年更新，由 ISO/IEC JTC1/SC7 管理，其  
中 ISO 委员会负责制定系统和软件工程的 ISO 标准。该标准使用以下四个类别定义系统工程过程：

239

- 技术；
- 项目；
- 协议；
- 企业。

这些类别中的每一个都由以下定义。

- 活动：实现设计规范所必需的活动，将输入转化为期望输出的一系列活动；
- 控制：表示系统设计的指令和约束；
- 启动器：基础设施、劳动力、工具、技术等基础资源，用以实现满足系统使用目的的系统设计；
- 输入：表示系统数据、信息和材料；
- 结果：表示系统功能，例如处理过的数据、产品和服务。

以下系统工程中经常使用的术语（Haskins 2006）定义取自 ISO/IEC 15288（见表 6.2）

表 6.2 常用术语的定义

术 语	定 义
活动	一系列消耗时间和资源的行动，其性能是实现或促成一个或多个成果所必需的
使能系统	在生命周期阶段用来补充一个系统的系统，但不一定直接影响其在运行过程中的功能
企业	组织的一部分，负责根据协议获得和提供产品或服务
组织	有责任、权威和关系的一组人员和设施
过程	将输入转换为输出的一系列相互关联或相互作用的活动
项目	根据指定的资源和要求以及开始和完成日期来创建产品或服务
阶段	与系统描述状态或系统本身相关的系统生命周期内的一段时间
系统	为达到一个或多个目的而组织起来的相互作用的元素的组合
系统元素	构成系统的一组元素的成员
感兴趣的系统	正在考虑生命周期的系统
系统工程	跨学科的方法和实现成功系统的手段。它侧重于在开发周期早期定义客户需求和所需功能，记录需求，然后在考虑完整问题的同时进行设计综合和系统验证。系统工程考虑到所有客户的业务和技术需求，目标是提供符合用户需求的优质产品（INCOSE）

来源：Systems Engineering Handbook, A Guide for System Life Cycle Processes and Activities, edited by Cecilia Haskins, 2007, INCOSE Systems Engineering Handbook, version 3.1

ISO/IEC 15288: 2008 是系统和软件工程生命周期过程的标准。它建立了一个通用框架，  
描述了由工程师设计的系统的生命周期，并在该框架内定义了一组过程和相关术语。这些过程  
可以应用于系统结构层次结构中的任何级别。这些过程的选定集合可以应用于系统的整个生命  
周期中，以管理和执行其生命周期的各个阶段。这是通过所有互动方的参与来实现的，其最终  
目标是使客户满意。

ISO/IEC 15288：2008 还提供了在获取和供应系统时支持组织或项目中使用的生命周期过程的定义、控制和改进的流程（http1 2015）。通过生命周期管理（LCM）实现生命周期过程（LCP）。生命周期管理是一种将工具和方法学纳入生命周期过程的管理方法。因此，它可以理解作为一种产品管理系统，可帮助企业在其整个生命周期内尽量减少与其系统/产品或系统/产品组合相关的环境和社会负担。如图 6.1 所示，可持续发展框架描述了通过使用生命周期过程实现可持续性的计划，并得到相关和可靠的数据集的支持以及适当的政策框架。（http2 2015）。



图 6.1 生命周期过程支持的可持续发展框架

ISO/IEC 15288：2008 涉及人造系统，可能有以下一个或多个配置：

- 数据；
- 设施；
- 硬件；
- 人类；
- 材料；
- 自然发生的实体；
- 程序（例如，操作员指令）；
- 过程（例如，向用户提供服务的过程）；
- 软件。

当系统元素是软件时，可以使用 ISO/IEC 12207：2008 中记录的软件生命周期过程来实现该系统元素（http1 2015）。

在 ISO/IEC 12207：2008 中，定义和分组了以下生命周期子过程（http3 2015）

- 协议：
  - 收购；
  - 供应。

- 组织项目启用：
  - 生命周期模型管理；
  - 基础设施管理；
  - 项目组合管理；
  - 人力资源管理；
  - 质量管理。
- 项目：
  - 项目计划；
  - 项目评估和控制；
  - 决策管理；
  - 风险管理；
  - 配置管理；
  - 信息管理；
  - 测量。
- 技术：
  - 利益相关方要求定义；
  - 需求分析；
  - 架构设计；
  - 实施；
  - 整合；
  - 验证；
  - 过渡；
  - 确认。
- 操作：
  - 维护；
  - 处置。

242

即使在部署了系统的所有系统元素之后，产品和项目管理也必须继续考虑到各种系统元素生命周期的变化，包括影响一个或多个系统元素的新技术和由于计划外产品改进导致的正常系统更换。系统是指面向任务或专用系统的集合，它们将资源和功能集中在一起，以创建一个新的、更复杂的系统，它提供的功能和性能比组成系统的总和还要多。标准化体现了系统工程的重要性，它随着工程系统的复杂性及其高度集成和非常复杂的小型化组件的增加而增长。这些组件呈指数级增加了组件摩擦的可能性，从而增加了设计的不可靠性。这需要对整个系统的属性进行识别和操纵，这在复杂的工程项目中可能与部件属性的总和不同。

这些因素提供了将系统工程应用于管理复杂性和变化的有效途径的动机。在今天的产品和服务中，复杂性和变化都有所增加。因此，降低与新系统相关的风险或复杂系统的修改是系统工程的主要目标。此外，从技术的角度来看，CPS 的复杂性可以在集成的规模、组件的多样性以及设计中涉及的学科的多样性方面得到缓解，也可以通过项目的整体组织（即以人为本的项目管理）来管理复杂性。项目管理一词是指一套管理和组织任务、技术和项目开发手段。它包括项目各方面的规划、监测和控制以及项目参与者的管理，以实现安全的项目目标。在这个定义中，功能和制度层面表现为两种观点。

总而言之，系统工程是一种基于自身因素的复杂方法，这些因素包括：



- 策略；
- 程序；
- 技术。

243

我们的目标是提高工程系统或产品的性能。因此，系统工程方法论适用于系统的生命周期，涉及系统或产品的概念化、设计、生产、使用、支持和关闭，无论是在组织内部，还是外部执行。此外，在它们的用途、应用领域、复杂性、大小、新颖性、适应性、数量、位置、寿命和进化等方面存在各种各样的系统，这就要求系统工程方法提供的设计方法能够正确地执行。但是设计方法和现有工具的演变还不足以满足不断增长的对直接解决系统日益复杂的新方法的需求。因此，系统工程的不断发展包括开发新的方法和模型，更好地理解系统工程的复杂性，例如基于模型的系统工程与功能模型分析，正如 6.2.1 节中 Baker (2015) 所述。系统工程中开发和其他使用的工具是：

- 集成计算机辅助制造 (ICAM) 功能建模定义 (IDEFO)；
- 统一建模语言 (UML)；
- 质量功能展开 (QFD)。

1. ICAM 功能建模定义 (IDEFO)

ICAM IDEFO 是描述生产函数的方法，为信息系统、业务流程或软件工程 (http4 2015) 的分析、开发、重新设计和集成提供功能建模语言。IDEFO 模型由一系列图表、文本和相互交叉引用的词汇表组成。IDEFO 中的两个主要建模组件为：

- 用框图表示功能；
- 用箭头代表功能相互关联的数据和对象。

如图 6.2 所示，箭头连接在框图上的位置传达了接口的具体作用。控件从顶部进入框图。操作的输入、数据或对象将从左侧输入框图。操作的输出由右侧离开框图。机制箭头提供支持功能的功能连接到框图的底部 (http4 2015)。

IDEFO 过程首先标识要分解的主要函数。此功能由定义特定 IDEFO 分析范围的顶层上下文图来标识。图 6.3 显示了信息系统管理过程的顶层上下文图 (http4 2015)。

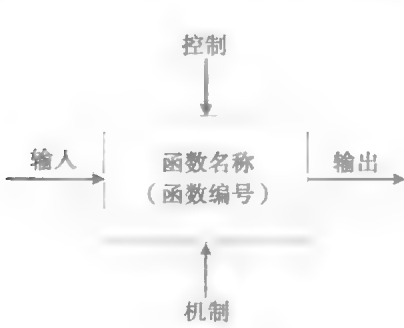


图 6.2 IDEFO 构建块

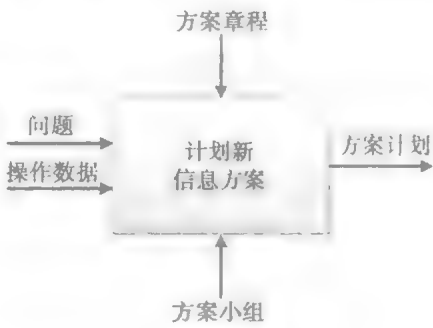


图 6.3 IDEFO 顶层上下文图

244

图 6.3 所示的目的是在信息集成评估方面对信息管理职能进行评估规划和精简。低等级图由图 6.3 生成。图 6.4 所示为 IDEFO 图的示例 (http4 2015)。

2. 统一建模语言活动图

统一建模语言 (UML) 是一种通用建模语言，旨在提供可视化系统设计的标准方法。2000 年，UML 被 ISO 接受。UML 描述了执行操作的顺序。所有行动一起描述了一个过程。案例研

究图显示了对对象之间的相互关系，活动图表示过程。图 6.5 显示了 UML 元素。

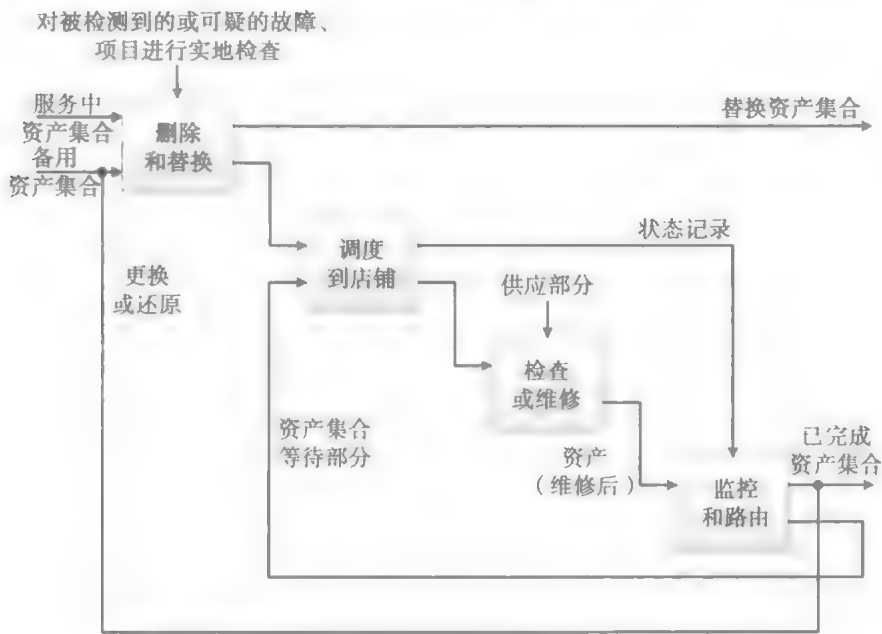


图 6.4 用于维护可修复备件的 IDEFO 图示例

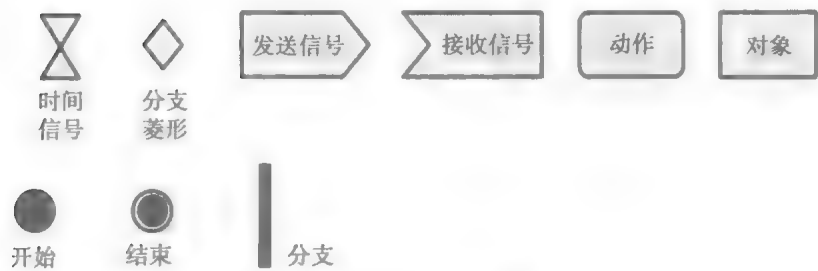


图 6.5 UML 元素

UML 活动图由节点和边组成。某些事件发生在节点上。边连接节点。令牌遍布整个活动图。UML 活动图以一个开始节点开始，以一个结束节点结束。



圆角矩形表示整个活动图中的单个动作。对动作的简短而精确的描述写在元素中。



矩形对象是 UML 活动图的另一个组件。它们用作对象的中间存储单元。数据由前面的动作移动到下一个动作，因此数据从一个操作传递到下一个操作。



菱形表示路径的一个划分或分支（例如，边）或是两条路径的合并。传入令牌将继续，但只能在其中一条线上输出。选择标准可以预先确定，然后记录到相应的边上。



黑线是一条称为分叉的分支。不同的是，一行上的令牌不仅在该行上继续，而且通过复制在所有行上继续。相反，将输入行和输出行合并在一起，第一个传入令牌必须等待其他令牌进行连接；然后可以继续统一令牌。为了允许其他过程访问元件，使用信号发射器和信号接收器。当发送信号时，与其关联的所有进程将不会执行。



时间信号

时间事件符号意味着动作被时间控制触发。时间信号在一定时间内停止图表的信号流。一旦时间结束，图表或令牌将继续。

在图 6.6 中，显示了基于 UML 活动图的飞机周转模型。该模型以飞机着陆开始至飞机起飞结束。着陆后，飞机必须等待停机位置的分配：直达门、终点坡道上、或者位于斜坡上远离终点的位置。作业后，飞机就停到这个位置。发动机关闭，制动块被应用。然后可以开始基于斜坡（终端）的地面处理过程。

UML 活动图允许创建表示现实世界抽象画面的模型，通过再现限制在某些时间段的重要属性来分析现实。模型如图 6.6 所示，涵盖了在 Hamburg 机场中进行的周转过程。从这个模型可以清楚地看出每个过程的实际顺序。在这个版本的模型中描绘的时间依赖的过程和并存接近现实。但由于地面电源的使用及其对加工时间的依赖性，最终型号与此版本有所不同。

247

使用地面电源的处理时间对应于所有其他间隙过程的处理时间之和。由于建模是基于分布函数的假设，因为 MATLAB 使用的时间不是预先知道的，所以处理时间的总和只能在进程结束时确定。如果我们假设以恒定的时间通过了当前模型，这将会是完全不同的。在这种情况下，处理时间是预先已知的，可以通过 MATLAB 函数从工作空间中取出并累加。此后，结果必须通过一个相应的 Simulink 块进入模型。然而，对于地面处理任务的成本分析，必须考虑到地面电源与剩余间隙过程并行进行的事实。因此，为了进行成本分析，地面处理成本模型必须涵盖所有其他试验，因为整个清除时间必须作为地面供电过程成本分析的一部分来计算。

3. 质量功能展开 (QFD)

在六西格玛的定义、测量、分析、改进和控制 (DMAIC) 中，质量功能展开 (QFD) 是系统工程需求定义阶段中使用的一种方法和工具。它用于 (http5 2015)：

- 用客户自己的语言填写客户的需求；
- 优先考虑这些需求；
- 将其转换为工程或过程需求；
- 建立满足要求的目标。

质量功能展开是以客户为导向的产品或服务规划流程。它是将客户需求转化为从概念定义 (R&D) 到流程工程和生产到市场的每个阶段的公司要求的一种方法。质量功能展开是将关键

客户（CTC）需求转化为关键质量（CTQ）需求的工具。质量功能展开以自己的语言收集客户的声音（VOC），并将该 VOC 纳入跨职能团队对集成开发过程的项目管理中。关键（C）过程建立客户目标和措施，并将其记录在一系列矩阵中，如表 6.3 所示

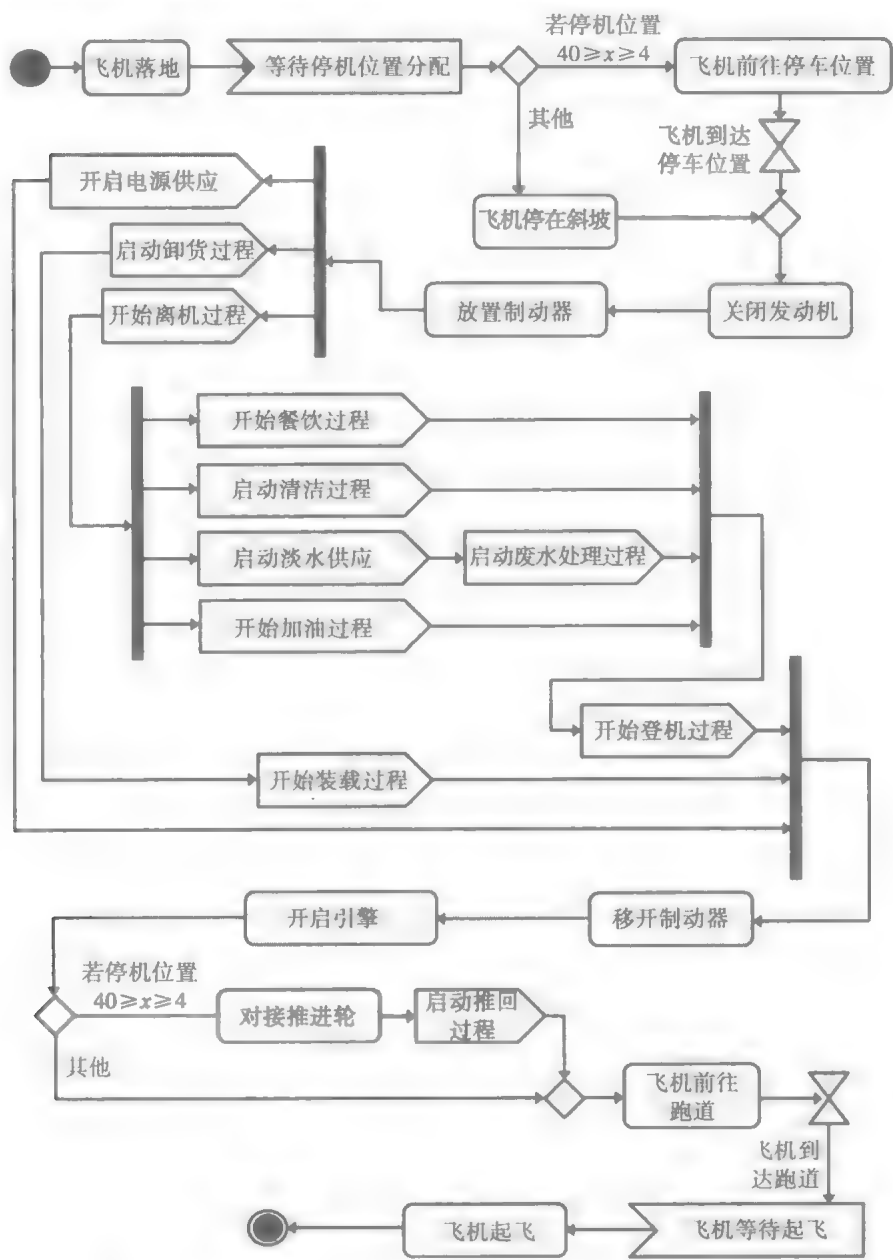


图 6.6 UML 活动图表示的飞机跑道周转过程（Moussaoui 2013）

QFD 矩阵将 CTC 转换为 CTQ。为此，QFD 矩阵显示了需求和选项之间的关系，如文献（http5 2015）所述：

- 确定内部和外部客户；
- 创建客户需求/愿望清单：
  - 询问客户问题，如产品的重要特点是什么？
  - 捕捉客户自己的话语或客户的声音；

248  
、  
249

- 如果需要，将得到的信息进行分组；
  - 以上收集的优先顺序为1~5，其中5为最重要，排名基于VOC数据，CTC在表6.3的第一列中垂直列出，并且所有相关的CTQ在顶部水平列出，在第二列中，根据CTC的重要性分配1~5，其中5是对客户最关键的；
  - 对每个CTQ与每个CTC的相关性进行评分，记住，我们看的是相关的绝对值，它可以是正相关或负相关，使用5表示强相关，1为弱相关。如果没有相关性，则留空，一些CTC的CTQ数量很少，其余的都是无关的；
  - 编写实现CTC所需的CTQ清单；
  - 将VOC中的CTC翻译成CTQ：
    - 箭头显示改变的方向（向上代表增加，向下代表减少等）；
  - 确定每个“做什么”和“怎么做”之间的相关性，如果相关性较强，则用5表示；如果相关性弱，则用1表示；如果在两者之间，则根据相关强度使用2、3或4表示；
  - 接下来，将CTC的重要性等级乘以每个CTQ的相关性得分；
  - 将垂直方向的每个CTQ相加，并将分数填写在最下面的一行。
- 一旦为所有CTQ计算得分，分数最高的是最高优先级的六西格玛项目目标

表 6.3 六西格玛质量功能展开矩阵 (http5 2015)

客户需求 或 CTC 或 “做什么”	重视 客户	“怎么做” 或公司/流程/工程内部的 CTQ								
		暂停时间	反馈得分	How3	How4	How5	How6	How7	How8	How9
需要帮助台快速反应	5	5	2	3	3	1	1	3	5	2
需要帮助台满意的结果	3		5			4	2		1	
What3	2	5		1	2			4		1
What4	1		1			1	5			5
What5		2	2	4	1	3		2		1
What6	3				2	4	2			4
What7		1	1	1				2	2	5
What8	3		3		2		1		1	2
What9	1	2	4	2	1		1	2	5	
What10	2	1	4	1	3	1	4			1
分数		39	47	21	38	32	34	25	36	37
CTO 平均值		2.5	3.1	2	3	6	0	1	2	7

6.1.2 自顶向下的系统工程方法

在传统工程设计方法中，自底向上的方法得到广泛应用。已知的组件被组合到集合中，基于这些组件，可以建立较大的子系统，并可以在多个级别上依次组合，以构建完整的系统原型。这种方法通常类似于种子系统原型，其初始化很小，但最终会变得复杂和完整。因此，设计中的所有项目可以根据最重要的系统架构集成在一起，形成最终系统的系统模型或原型。当开发系统原型时，可以测试所需的性能；并且可以以迭代的方式修改设计，直到系统原型不符合所需的要求。因此，自底向上的方法对于明确定义的相对简单的设计是有效的并且非常有

用 自底向上的方法可以理解为一种基于传入数据形成感知的信息处理类型。不幸的是，更复杂的设计问题不能用自底向上的方法来解决。

今天在系统工程中使用的方法首先是将系统设计为一个整体，这有助于理解系统、环境和接口。如果清楚了解系统级的要求，那么将设计的系统分解成子系统；子系统将进一步分解成集合，然后组成组件，直到从上到下实现对系统的完整了解。因此，这种系统工程方法与传统的自底向上的工程设计方法相反，因为系统工程方法采用自顶向下的开发方法来管理复杂系统的开发。通过最初查看整个系统，然后逐渐将系统分解成更小的元素，可以更全面地了解组件之间的相互作用。这有助于识别和设计组件之间（内部接口）以及组件与其他系统之间（外部接口）必需的接口（Faulconbridge and Ryan 2014）。

第一个专业系统工程学会，即系统工程国际委员会（INCOS），直到 20 世纪 90 年代初才开始组织，并且第一个商业系统工程标准 ANSI/EIA-632 和 IEEE 1220 紧随其后。即使使用不同的方法来定义系统工程，组织迫切需要创建估计的能力。有几种启发式方法，但是它们没有提供必要的详细程度来了解最有影响力的因素及其对成本的敏感度。

ANSI/EIA-632 标准包含 5 个基本过程和 13 个高级过程类别，它们代表了系统工程组织过程类别进一步划分为 33 个活动，如表 6.4 所示（Valerdi and Wheaton 2005）。

表 6.4 ANSI/EIA-632 过程和活动

基本过程	过程类别	活 动
获取和供应	供应过程	(1) 产品供应
	获取过程	(2) 过程获取
		(3) 供应商绩效
技术管理	规划过程	(4) 过程实施策略
		(5) 技术工作定义
		(6) 时间表和组织
		(7) 技术方案
		(8) 工作指示
	评估过程	(9) 针对计划和时间表的产品进度
		(10) 对需求的进展
		(11) 技术审查
	控制过程	(12) 成果管理
		(13) 信息传播
系统设计	需求定义过程	(14) 收购方需求
		(15) 其他利益相关者的需求
		(16) 系统技术要求
	解决方案定义过程	(17) 逻辑解决方案表示
		(18) 物理解决方案
		(19) 指定要求
产品实现	实施过程	(20) 实施
	过渡到使用过程	(21) 过渡到使用
技术评估	系统分析过程	(22) 有效性分析
		(23) 权衡分析
		(24) 风险分析

(续)

基本过程	过程类别	活 动
技术评估	需求验证过程	(25) 需求报表验证
		(26) 收购方需求
		(27) 其他利益相关者的需求
		(28) 系统技术要求
		(29) 逻辑解决方案表示
	系统验证过程	(30) 设计方案验证
		(31) 最终产品验证
		(32) 使产品准备就绪
	最终产品确认过程	(33) 最终产品确认

图 6.7 从产品的角度说明了用于自顶向下方法的 ANSI / EIA-632



图 6.7 包括运行产品和使能产品的系统的 ANSI/EIA-632 构建块概念（ANSI/EIA-632-1998）

系统开发自顶向下进行，系统实现是自底向上组织的集成过程，如图 6.8 所示（Faulconbridge and Ryan 2014）。

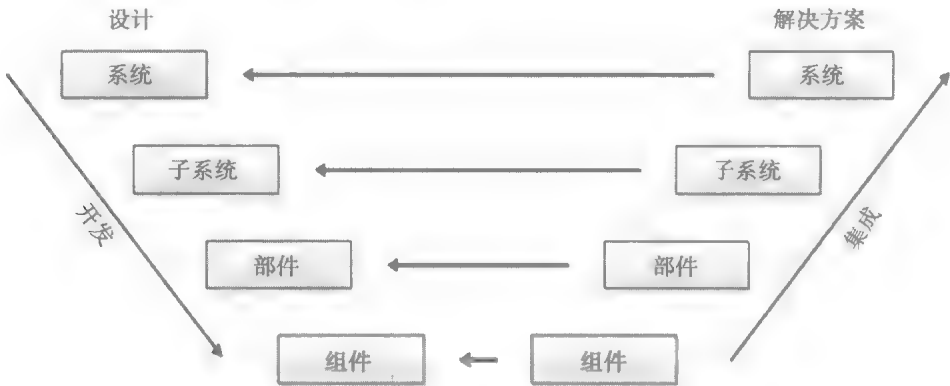


图 6.8 自顶向下的开发和自底向上集成过程

ISO 和 IEC 形成了全球标准化专业系统 作为 ISO 或 IEC 成员的国家机构通过由各自组织

设立的技术委员会来参与国际标准的制定，以处理技术活动的特定领域。ISO 和 IEC 技术委员会在共同关心的领域进行合作。ISO/IEC 15288 是涵盖过程和生命周期阶段的系统工程标准。ISO/IEC 15288: 2002 (E) 标准的初步规划始于 1994 年，当时需要一个共同的系统工程过程框架。2004 年，该标准被采用为 IEEE 15288。ISO/IEC 15288 标准于 2008 年 2 月 1 日更新。ISO 15288 由 ISO/IEC JTC1/SC7 管理，这是 ISO 委员会负责制定软件和系统工程方面的 ISO 标准。ISO/IEC 15288 是 SC 7 集成标准的一部分 (http3 2015)。

ISO/IEC 15288 还提供了支持定义、控制和改进组织或项目中使用的生命周期过程的流程。组织和项目可以在获取和供应系统时使用这些生命周期过程。ISO/IEC 15288 系统工程系统生命周期过程的生命周期阶段根据系统的性质、目的、用途和普遍情况而有所不同。尽管在系统生命周期模型中有无限的多变性，但在系统工程领域中仍然存在着的一组必需的特征生命周期阶段。这些阶段已略作修改，以反映 ANSI/EIA 632 模型的影响，如图 6.9 所示 (Valerdi and Wheaton 2005)。

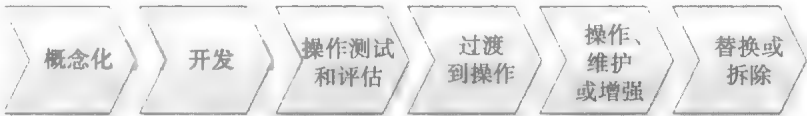


图 6.9 ISO 15288 生命周期阶段

图 6.9 所示的每个阶段都有明确的目的和对生命周期的贡献，并代表了与系统相关联的主要生命周期之一。这些阶段还描述了该系统在其生命周期中的主要进展和成就里程碑。这些生命周期阶段有助于回答系统工程和建设性系统工程成本模型的时间问题。理解系统工程相对于系统生命周期的执行有助于定义模型的锚点。表 6.5 显示了所研究的组织在系统工程的整个生命周期阶段的典型分布。需要注意的是在每个阶段的标准偏差 (Valerdi and Wheaton 2005)

表 6.5 跨 ISO 15288 的系统工程工作，生命周期阶段

阶段	概念化	开发	操作测试和评估	过渡到操作
工作的百分比	23	36	27	14
标准偏差	12	16	13	9

6.1.3 开放式机电一体化自动化工程平台

制造设施的建设和运营的复杂性是行业必须处理的一个中心议题。原因是今天的生产线由网络实时计算机系统进行控制和监控。随着制造业本身日益复杂化，与规划和投入运作相关的工作也在增长。这需要针对工业自动化系统工程师的需求进行适当调整的特定信息和通信系统。

这促使在面向功能的体系结构中创建所谓的机电自动化组件的开放式工程平台，其目的是在制造系统的控制体系结构和工程过程中设置一个新的标准。通过这种新的标准自动化，系统工程师在设计组件时不再需要考虑信息技术，而是需要考虑系统自动化的功能方面。为了实现这一目标，该标准允许工程师直接与基于 3D 的工程接口进行交互，而不是抽象变量或输入/输出信号。这些组件包括从机械、电子、软件到标准端口和维护信息所需的一切操作。结合自动化组件的特定接口技术，将可以实现真正的“即插即用”方法。这将使得昂贵的安装、布线、管道系统、配置和系统集成最小化，就像以前的集中式自动化系统一样。关于即插即用的机电

252  
254



255

一体化组件和3D模型,跨公司和工业部门边界的通信是可能的,这有助于提高整个项目链的价值。由于所有公司和工业部门都是项目价值链的一部分,因此可以开发新的商业模式作为项目的一部分(http6 2015)。新标准的特点是:

- 开放的架构;
- 自治组件;
- 新标准;
- 3D交互。

在适应性制造系统方面,未来工厂的愿景要求引入开放平台标准。重要的是节约资源和最小化安装时间,以满足日益增长的产品种类。

## 6.2 信息物理系统中的设计挑战

信息物理系统(CPS)是一种新的系统工程,它把物理和计算世界结合起来,以整体的方式来表示和设计复杂的系统。然而,CPS正在从物理和计算组件的密集交互中形成,这对于这个快速发展的领域需要新的系统工程原理。使用传统工程方法设计复杂系统可能会导致质量和可维护性方面的各种问题,因为CPS的系统工程方法才刚刚开始发展。已经产生了一些方法,例如:

- 利用公理设计理论,其中将设计定义为在所需要的内容和如何实现过程之间映射过程(Suh 2001; Togay 2014);
- 采用自适应信息物理系统框架(ACPSF)(Tanik and Begely 2014)进行CPS设计的自动化方法,为设计自动化提供了有力的指导方针,可以扩展以支持CPS设计;
- CPS设计挑战(Patterson et al. 2014),其中引入了多学科知识需求和多层CPS设计。针对上述方法,将描述CPS系统工程中的挑战。

当观察CPS时,必须发现两个主要因素:物理过程及其信息部分,它们处理来自物理过程的数据以执行所需的任务。因此,CPS设计中系统工程中的跨学科性本质上是复杂的,因为系统组件的行为和相互作用往往并不总是立即被很好地定义或理解。定义和描述这些系统和子系统以及它们之间的相互作用是系统工程需求的一部分。用户、操作员、技术规范等需求之间存在的差距必须成功桥接。

256

3.3.1节介绍了CPS中的主要系统工程需求。本节清楚地表明,CPS的复杂性需要多个工程学科的努力来推进和解决系统工程的挑战。从更一般的角度来看,可以通过发现过程来了解系统工程需求,发现过程从发现需要解决的真实问题开始。通过查看“如何做和做什么”的答案可以找到问题所在。因此,系统工程中的需求分析可以从以下陈述和问题开始,以确保客户的需求在整个系统的整个生命周期中得到满足(Haskins 2006; Li 2008; http3 2015; http7 2015)。

- 说明可能从以下问题的答案中得出的问题:
  - 这是怎么做的?
  - 在系统工程中使用流程图时会发生什么?
  - 系统工程师应如何搜索客户的环境,以了解客户计划如何使用系统?
  - 在客户访谈中,当先验知识模糊时,如何搜索顾客的环境?
  - 哪些其他方法可以帮助满足说明问题的要求?
  - 如何使需求验证方法(RVA)变得有帮助(http8 2015)?
  - 使用RVA的本质问题是什么?

- 调查可从以下问题的答案中获得的备选方案：
  - 如何在几个备选方案中做出决定？
  - 测试产品是否合格的标准是什么？
  - 什么标准是最关键的？
  - 应该进行什么权衡研究和彻底学习？
  - 如何将它们转化为实际问题？
- 对从以下问题的答案中得出的系统进行建模：
  - 什么是所有系统的通用模型？
  - 系统工程如何负责创建产品和生产过程？
  - 模型之间有什么区别？
  - 建立系统的首要任务是什么？
- 集成系统组件，这些组件可能来自以下问题的答案：
  - 集成系统并将子系统结合在一起产生所需结果的最有效方法是什么？
  - 如何设计和管理子系统之间以及主系统与外部环境之间的接口？
  - 可以进行怎样的系统工程假设和比较研究来确定流程是否成功？
- 启动系统，这可能源于以下问题的答案：
  - 系统如何启动？
  - 让利益相关者有机会对提出的变更发表评论？
  - 可接受多少意见？
  - 如何确定是否决定实施变更的责任？
  - 如果所有系统工程活动都记录在公共知识库中，即知识的工程手册中，会产生什么影响？
  - 笔记本对日常工作真的有帮助吗？
  - 人们对此有何看法？
  - 要求人们一直遵循笔记本电脑的影响是什么？
- 评估绩效，这可能来自以下问题的答案的：
  - 如何衡量系统的性能？
  - 何方便地验证系统是否符合要求？
  - 如何确定最终系统是否满足每个系统需求？
  - 我们如何确保最终版本满足强制性要求？
  - 最终构建能否满足权衡要求？
- 重新评估，可从以下问题的答案中得出：
  - 关于验证和确认，重新评估意味着什么？
  - 应如何进行重新评估？
  - 什么样的过程是必需的，并且应该什么时候做？
  - 让某人特别指派做这项工作有什么影响？

257

如参考文献 (Li 2008) 所述，重新评估是系统工程中最重要的任务。几个世纪以来，工程师们一直使用反馈来控制系统，并提高性能。重新评估意味着观察输出，并使用此信息来修改系统的输入、产品或过程。重新评估应该是一个持续的过程，有许多并行循环，因为系统工程不是顺序的。上述功能可以用缩写词 SIMILAR 进行总结，其代表状态、调查、模型、整合、发布、评估和重新评估 (Bahill and Gissing 1998; http9 2015)。

[258]

SIMILAR 任务是以并行或迭代的方式执行的。在每个步骤中,逐步集成和完善一整套可能的工程模型以定义目标系统。几个系统工程领域使用一个相互作用的概念综合以初步影响分析,并且初步影响分析利用了仿真工具和替代需求以及设计配置决策 (Pollet and Chourabi 2008; Tarumi et al. 2007)。

INCOSE 系统工程卓越中心 (SECOE) 的分析表明,用于系统工程的最佳工作量约占项目总体工程量的 15% ~ 20% (INCOSE 2007)。同时,研究表明,系统工程本质上会导致成本的降低,以及其他好处。然而,直到最近才进行了更广泛的包括各种行业的定量调查。这些研究正在进行中,以确定系统工程的有效性和量化效益 (Elm 2005)。

此外,系统工程鼓励使用建模和仿真来验证系统的假设或理论及其内部的交互。仿真技术属于工程应用领域的工程师所使用的工具集,已被纳入工程管理知识体系之中。建模和仿真有助于降低成本,提高产品和系统的质量,并记录和归档所学到的经验教训。

此外,系统工程将从系统的需求定义、操作和零度利用开始解决方案的开发。这样可确保领域专家得到妥善的参与,追求所有有利的机会,并确定和减轻所有重大风险,这些风险要求将系统工程流程从以文档为中心的方法转移到以数据为中心的方法。以文档为中心的方法遵循以下顺序 (Baker 2015):

- 规格;
- 接口要求;
- 系统设计;
- 分析和权衡;
- 测试计划。

当项目信息分散在多个文档中时,很难评估需求、设计、工程分析、验证和确认信息之间的完整性、一致性和关系。建立支持变更影响评估所需的端到端可追溯性也很困难。

为了解决这些以文档为中心的局限性,更先进的系统工程流程正在转型为以数据为中心的方法,该方法允许所有系统工程团队成员访问任何项目或相关数据。因此,以数据为中心的方法是 Cradle 软件工具的主要部分,即需求管理和系统工程工具。Cradle 将整个项目生命周期集成到一个可伸缩的、多功能的多用户软件产品中。它识别要捕获的数据,如图 6.10 中的 Baker (2015) 所示。图 6.10 中使用的术语任务是术语用例的同义词。

[259]

### 6.2.1 使用 Cradle 的需求定义和管理

Cradle 软件工具可用于管理系统开发和修改的需求定义和管理活动。Cradle 将需求定义和管理活动分为八个阶段,如图 6.11 所示。6.2.1 节、6.2.2 节和 6.2.3 节中的描述来自白皮书“需求定义和管理活动”,2014 年 11 月由 3SL 发布 (3SL: Structured Software Systems Ltd)。

图 6.11 中的“AND”节点 (写有 A 的圆圈) 表示“AND”节点连接的两个阶段可以并行执行。如图所示,阶段 3、阶段 4 和阶段 5 可以并行执行。

图 6.11 中的“ITERATE”节点 (写有 I 的圆圈) 表示在系统架构层次结构中为每个级别重复两个“ITERATE”节点之间的所有阶段。层次结构中的 1 级标识系统实体,如图 6.12 所示。因此,等级大于 1 的每个实体被识别为系统元素 (即层次结构中父实体的子组件)。在系统层次结构的底层,系统元素代表硬件配置项 (HWCI)、计算机软件配置项 (CSCI) 和用户 (人)。

对于要开发系统需求的每个系统元素,重复图 6.11 中的阶段 2 到阶段 7。这八个阶段的细节以及 Cradle 工作产品样品见 6.2.2 节。

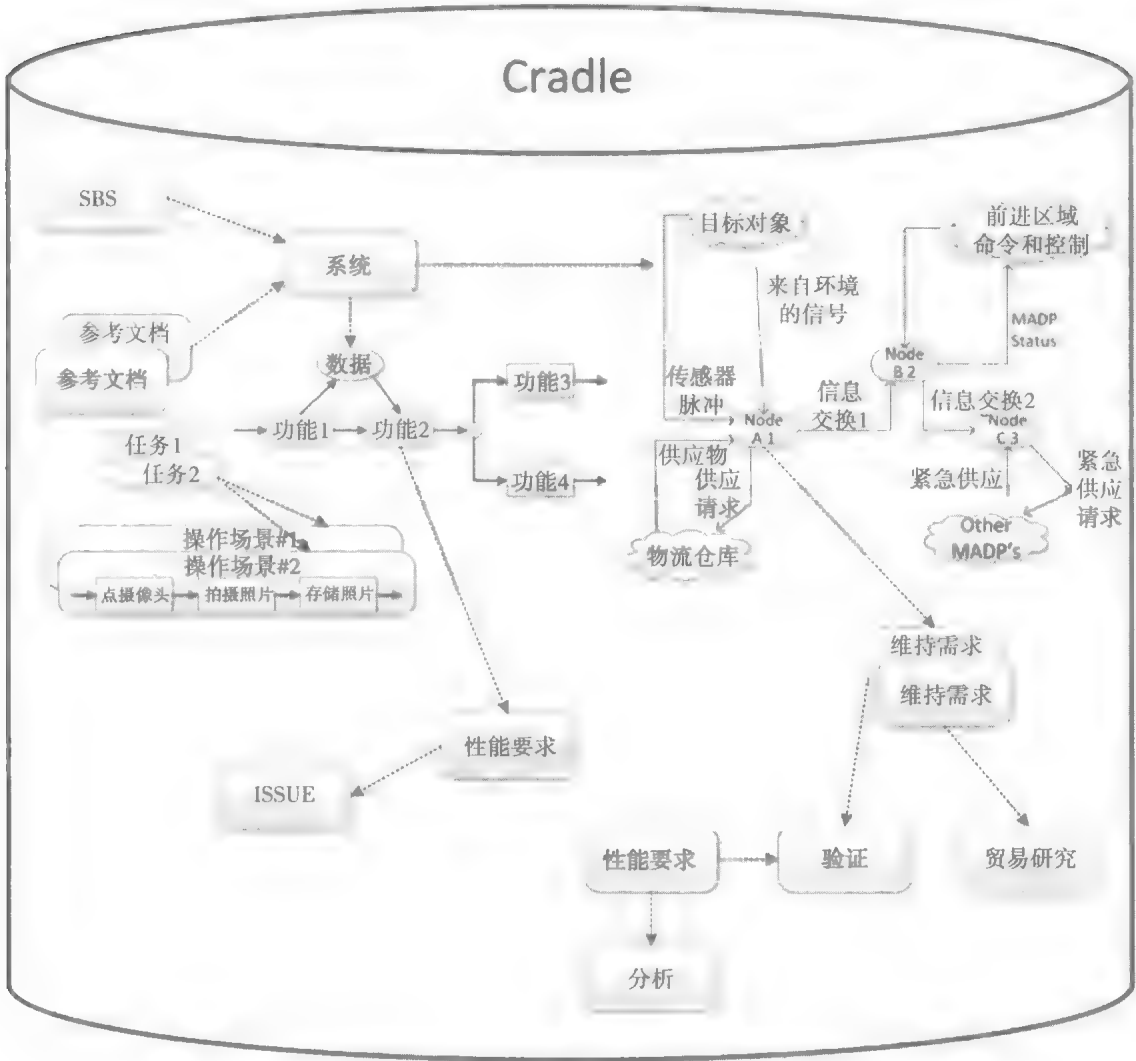


图 6.10 在 Cradle-7 中以数据为中心的方法的项目数据存储库

上述八个阶段的需求定义和管理活动之间的可追溯性如图 6.11 所示。并且“INCOSE 系统工程手册” (Hamelin et al. 2010) 的 3.2 版中引入的类似技术过程活动在 6.2.3 节详细介绍，得出表 6.6 追溯表显示，Cradle (Cradle-7 2014) 描述的需求定义和管理活动符合 INCOSE 手册和 ISO/IEC 15288: 2008 (参见 6.1.2 节)。

6.2.2 需求定义与管理活动

6.2.1 节介绍了 Cradle 中的需求定义和管理活动，分为八个不同阶段。本节详细描述这些阶段的方法。

- 阶段 1——定义操作概念和利益相关者需求：这一阶段的活动为在项目启动阶段确定项目范围，制定操作概念文件 (ConOps)，制定一套利益相关者需求并将其写入利益相关者需求文件 (SRD) 中。
- 阶段 2——定义系统和系统元素上下文：此阶段的活动是为主系统元素生成系统上下文图，以标识所有必须与系统元素和所需外部接口交互的外部实体。外部接口必须在图 6.11 中的阶段 3 到阶段 7 之前进行识别。

- 阶段3——定义系统元素：此阶段的活动定义了指定系统元素的物理特性，并为该元素派生出适当的系统需求。此后，需要将系统元素分解为其组成部分（层次结构的一级），以及确定每个子元素的物理特性。
- 阶段4——定义功能行为：确定系统功能及其输入和输出，以满足先前设计周期中确定的系统元素功能需求。这些功能在集成时，描述系统必须展现的所需行为。在阶段5中，功能必须分配给特定的系统元素（即必须执行功能的事物）。
- 阶段5——将功能分配给系统和系统元素：在此阶段，将功能和输入/输出（I/O）（在阶段4中标识）分配给不同的系统元件和接口，这在工程中称为功能分配。这意味着指定特定系统元素的行为。
- 阶段6——分析系统需求并执行验证计划：在这个阶段中，在之前的设计周期结束时，分析了在阶段3到阶段5中所得到的系统需求，以明确其对利益相关者/系统需求的清晰性、完整性、一致性和可跟踪性。此外，应对新创建的系统需求执行验证计划活动，并建立需求基准。
- 阶段7——为系统和系统元素生成文档：一般来说，这涉及生成用于支持每个项目评审的可交付文档和数据包。
- 阶段8——进行系统验证和确认（V&V）跟踪：捕捉数据库中每个验证和确认活动的状态，并追溯到需求影响和操作场景。可追溯性通过可能需要修改的设计解决方案的链接来识别这些要求。

先前对需求定义和管理活动阶段的说明在以下小节中有更详细的描述。

263

节中有更详细的描述。

### 阶段1：定义运行方案和利益相关者需求

阶段1的目的是定义系统需求，该系统可以在定义的环境中为用户和其他利益相关者提供必要的服务。项目的成功取决于能否满足这些需求和要求。与此阶段相关的活动有：

- 活动1.1——明确定义并记录项目范围。为项目创建一个顶级的系统分解结构（SBS）项目，并捕获项目目标、计划进度和预期利益相关者。详见3SL（2014）。

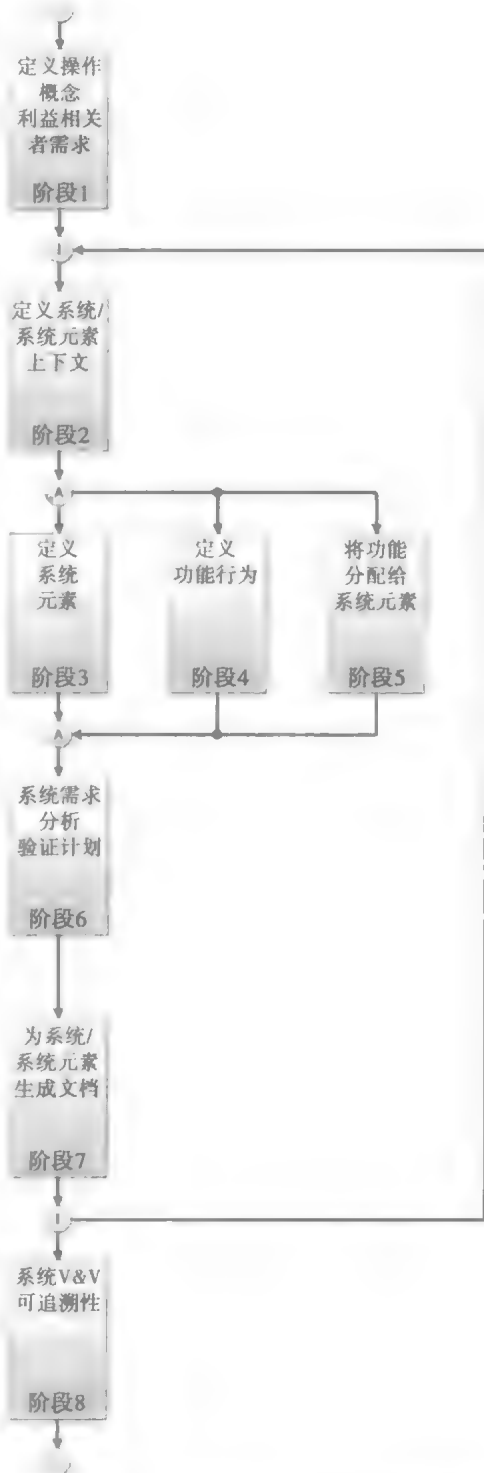


图6.11 Cradle 软件工具八个阶段的需求定义和管理活动

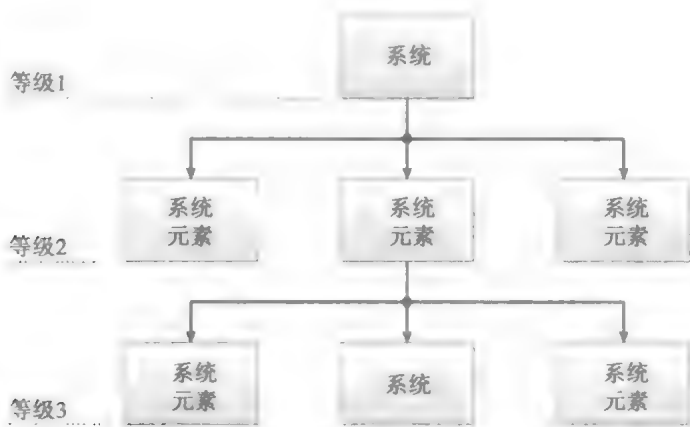


图 6.12 Cradle 中的系统等级

- 收集与项目相关的源材料，并使用特定的项目类型将其存储在 Cradle 数据库中。所创建的项目应与正在开发的系统的顶级 SBS 项目相互参照。
- 访问确定的利益相关者，并捕捉他们的需求和目标。将每个需求和目标链接到顶级 SBS 项目中。详见 3SL (2014)。
- 确定产品生命周期阶段（如生产、操作、处置）以确定利益相关者的需求
- 活动 1.2——定义用例。在每个适用的生命周期阶段开发用例。术语用例与任务同义，例如，图 6.13 定义了运行阶段的用例图。

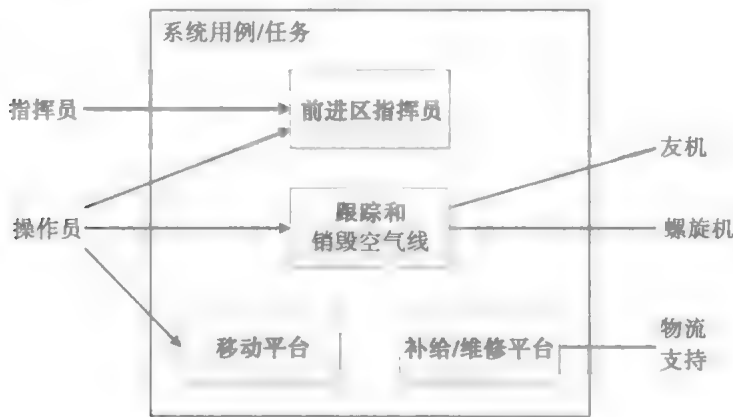


图 6.13 运行阶段用例图

- 活动 1.3——制定运行方案。根据之前定义的用例或任务创建运行方案（ConOps）。
  - 定义一个或多个操作场景来完成每个用例和任务识别。
- 操作场景是描述如何在整个产品生命周期内使用、制造、测试、部署或运行系统的过程或活动流程。典型的场景是 I/O 操作的刺激响应流程，它被引入到图 6.14 中的操作场景 1 中。这些场景来自最终利益相关者的观点，而不是产品开发者。“OR”节点（写有 O 的圆圈）表示两个“OR”节点之间的方案可以以析取的方式执行。
  - 过程流程图（PFD）用于描述操作场景。在特定用例和由 PFD 建模的一组操作场景之间建立可追溯性。将操作场景链接到用例。详见 3SL (2014)。
  - 通常需要多个场景来了解与完成每个任务或用例相关的操作活动和 I/O。
  - 将用例规范项目链接到顶级 SBS 以实现可追溯性。

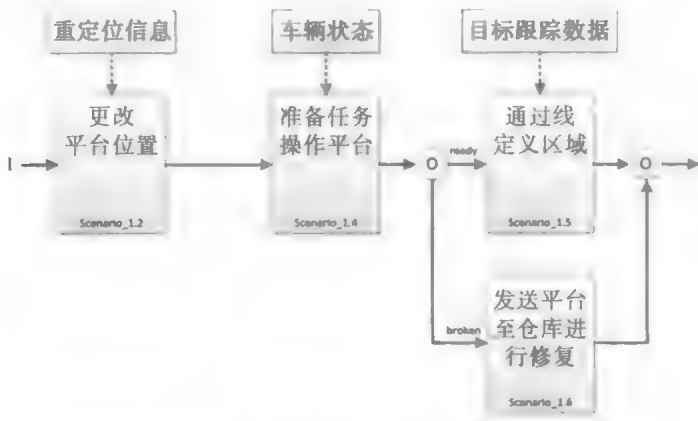


图 6.14 操作场景 1

- 活动 1.4——创建利益相关者需求：定义需求，以确定系统将提供的预期操作服务以及系统与操作环境之间的交互。
  - 利用业务流程开发过程中确定的需求、目标以及不同的操作，以获取解决具体利益相关者需求所需的知识。一旦为建议的需求创建了一个新的数据库项目，就输入一个“shall”语句，然后将其与源材料（即需求或场景操作）相互参照。详见 3SL (2014)。
  - 如果提供了包含重要信息（如利益相关者需求或测试用例）的源文档，请使用 Cradle 文档装载程序将文档的内容解析为单独的信息，这些信息将作为单个项目自动加载到 Cradle 数据存储库中。
  - 如果其中一个创建的项目具有从原始源文档捕获的多个“shall”语句，请使用 Cradle “split” 命令自动创建包含单个“shall”语句的新子项。
    - 使用 Cradle 一致性检查器来验证在需求声明中使用好的和坏的短语。
  - 创建 SRD，并与客户进行审核，以确保其有效，满足客户的需求，并被所有利益相关者明确理解。
  - 利益相关方的需求和相关的操作场景是系统开发人员在阶段 2 到阶段 6 中得出系统级设计需求的基础。这些设计需求称为系统需求。
- 活动 1.5——计划系统验证。计划在集成和测试期间执行系统验证活动，通过开发验证目标来验证系统是否满足 SRD 中定义的利益相关者的需求。每个验证目标确定完成验证活动所需的验证方法、设施、设备和资源，并且应与被验证的利益相关者需求联系在一起，如图 6.15 所示。
- 活动 1.6——识别和捕获设计约束。识别和捕获数据存储库中的设计约束。
- 活动 1.7——捕获词汇表。包括一个常见的词汇表项目，以便项目成员可以收集包含在已发布文档中的术语列表和首字母缩略词。

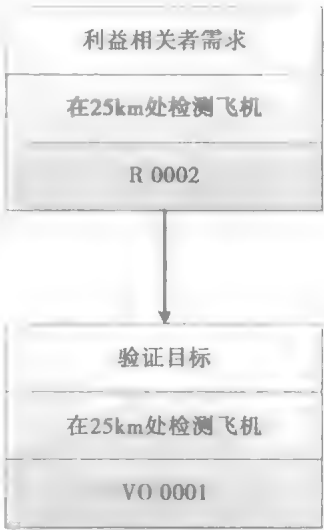


图 6.15 满足利益相关者需求的验证目标

阶段 2：定义系统和系统元素上下文

系统工程中的系统上下文图定义了系统或系统元素和与系统

交互的外部实体之间的边界。系统和外部实体之间交换的高级信息也在图中显示。该图是拟建系统的高级、黑盒视图，该系统需要外部 I/O。

- 活动 2.1——创建上下文图 使用前一阶段开发的信息，并且使用 Cradle 物理架构图 (PAD) 创建一个系统操作上下文图。该图的目的是定义系统或系统元素的顶级外部接口。
  - 将黑盒系统或系统元素绘制在图的中心，如图 6.16 所示。
  - 将外部环境实体绘制为围绕在系统或系统元素符号周围的矩形，如图 6.16 所示。
  - 使用注释箭头，在所提出的系统或系统元素和系统的外部实体之间绘制外部接口，如图 6.13 所示。必须在图 6.11 中的阶段 3 到阶段 7 之间识别这些外部接口。
  - 操作场景的 I/O 为识别候选外部接口提供了良好的起点。
  - 将上下文图链接到当前正在执行阶段 2 至阶段 7 的主 SBS 项目。建立这种可追溯性，以便审阅者或用户可以访问 SBS 项目，并遵循所有相关信息的交叉引用。在后续阶段，额外的相关信息将与此项目相关联。详见 3SL (2014)。

[267]

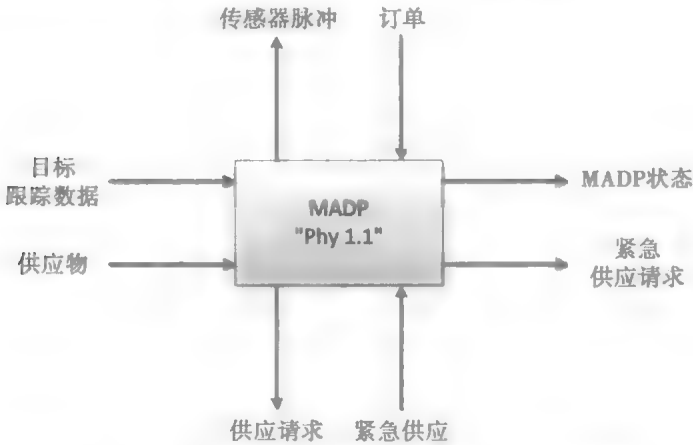


图 6.16 Cradle MADP 上下文图 (MADP: 移动防空平台)

- 活动 2.2——识别外部接口 由于该上下文图是为系统本身而不是较低级别的系统元素 (即组件部分) 构建的，因此接口信息必须与接口利益相关者需求交叉引用，以证明接口的存在。换句话说，上下文图上显示的界面都应该追溯到接口利益相关者的需求。在以下 Cradle 查询视图中，一些接口项目已被追溯到接口利益相关者需求中。详见 3SL (2014)。
  - 由于接口用于系统工程过程其他阶段的各种设计解决方案，因此可根据需要生成一个 Cradle 跟踪视图支持需要的影响分析。详见 3SL (2014)。
  - 对系统层次结构的每一级重复阶段 2。当为下级系统元素创建上下文图时，源素材将是前一周期中所分配系统需求。

阶段 3：定义系统元素

系统由一组相互作用的系统元素组成，可以实现每个系统元素以满足其各自的系统需求。系统元素具有结构 (它是如何构建的) 和行为 (它的作用)。系统元素的一个例子是硬件配置项、软件配置项或操作员，它们都执行工作。

在定义系统元素时，将结构定义与功能行为定义分开是很重要的。如果期望的行为是独立于预定义的物理结构开发的，则可以用映射到每个备选方案的期望行为来评估可选组件，因此



它们都表现出期望的行为。然后可以进行权衡分析以确定最佳解决方案。功能行为（在阶段 4 中描述）到系统元素结构（在本阶段中定义）的映射称为功能分配，如图 6.17 所示。

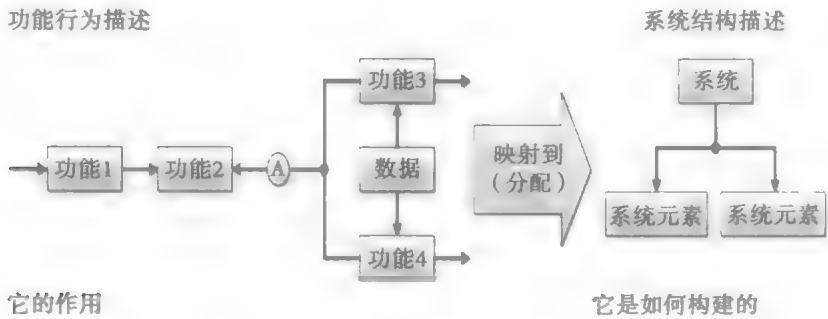


图 6.17 功能行为分配

此阶段的目的是为指定的系统元素定义所需的物理特性，然后为该元素导出适当的系统需求。接下来，系统元素分解为其组成部分（层次结构中的一个级别）；并确定了一组物理特征。深入一级有助于识别缺失的信息或不一致的系统元素物理特征，如图 6.18 所示。

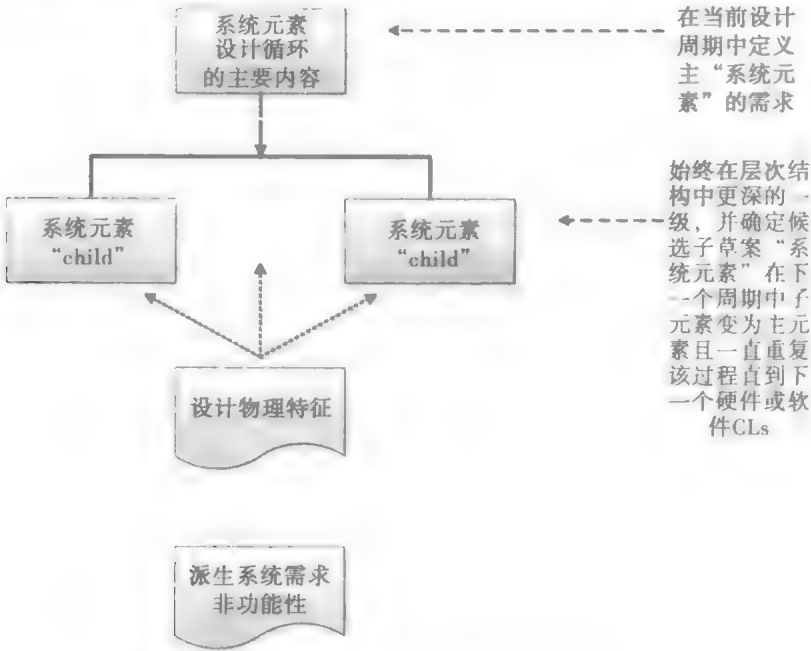


图 6.18 系统元素所需的物理特性

现阶段的活动如下：

- 活动 3.1——分析系统元素源信息。
  - 使用在阶段 1 开发的源信息，或在前一个设计周期的阶段 3 至阶段 7 中开发的源信息，进行分析和交易研究，以确定材料中的任何错误。如果发现错误，通过 ISSUE 项目类型记录它们，并将其链接到相关项目中。
  - 为主系统元素 SBS 项目创建一个系统元素（设备规格项目），并将它们链接在一起。详见 3SL（2014）。
  - 在数据库中创建一个项目，用于进行任何贸易研究，并将该项目链接到适用的 SBS 项目，以便在项目审查过程中了解并提供这些信息，如下图所示：

↓

Item Type	SBS ID	Name	Linked Source Material		
			Identity	Name	Item Type Summary
SBS	MADP 1	Mobile Air Defense Platform (MADP)	Ref_3	Environmental Considerations and Laboratory Tests	REF DOC
			Ref_20	Friendly Aircraft List	REF DOC

- 活动 3.2——定义非功能性系统需求。此活动的目的是为指定的系统元素指定所需的物理特性，然后为该元素导出适当的系统需求。下图显示了分配给主系统元素的非功能性需求的示例，如下图所示：

↓

Item Type	Name	Description	System	Req ID	Name	Item Type	Req Category
Phy 1.1	MADP Physical Model (PAD)	The main interfaces for the Mobile Air Defense Platform are illustrated in the following diagram	System	R-001	Air Defense System Mounted on All Terrain	System Req	Non-Functional
				R-011	Vehicle Safety Record	System Req	Non-Functional
				R-012	On Road Platform Weight	System Req	Non-Functional

- 活动 3.3——定义候选子系统元素。主系统元素及其候选子系统元素在当前设计周期中进行分析的示例如下图所示。通过在系统架构层次结构中进一步深入，可以帮助开发人员识别丢失的信息或不一致的系统元素物理特性，如图 6.19 所示。



图 6.19 子系统元素

阶段 4：定义功能行为

在开发和验证主要系统元素的功能和性能需求时，系统工程师使用的常用技术是构建功能行为模型。开发这些行为模型来识别系统元素必须执行的功能。这些模型是从系统开发人员而不是利益相关者的角度开发的。

270

行为模型由三个事物组成：

- 函数，接受输入并将其转换为输出，函数由系统元件执行；
- 各种类型的输入和输出；
- 控制运算符，有条件地定义函数的执行顺序。

工程师们在开发了文本需求文档之后，可以选择开发功能模型，而其他许多人则遵循阶段 4 的活动描述的过程。但是最好的做法是什么呢？哪一个先来？如图 6.20 所示。

首先开发本阶段的活动假定模型。但是，如果项目有一组需要在新系统中实现的明确定义

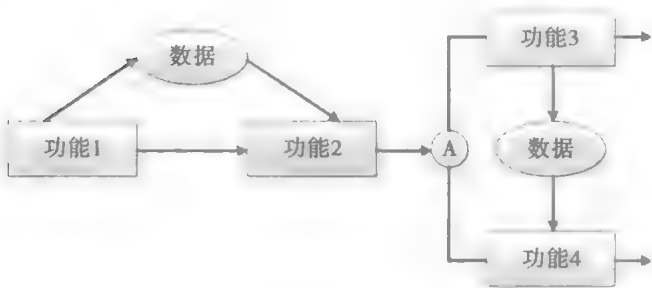


图 6.20 功能模型

的函数集，那么可以跳过模型开发活动，将函数列表导入到 Cradle 中，并继续进行其他活动

● 活动 4.1——开发主要系统元素的功能模型。

- 使用上一个设计周期的源需求，定义所需的函数和 I/O，如图 6.21 所示。

271

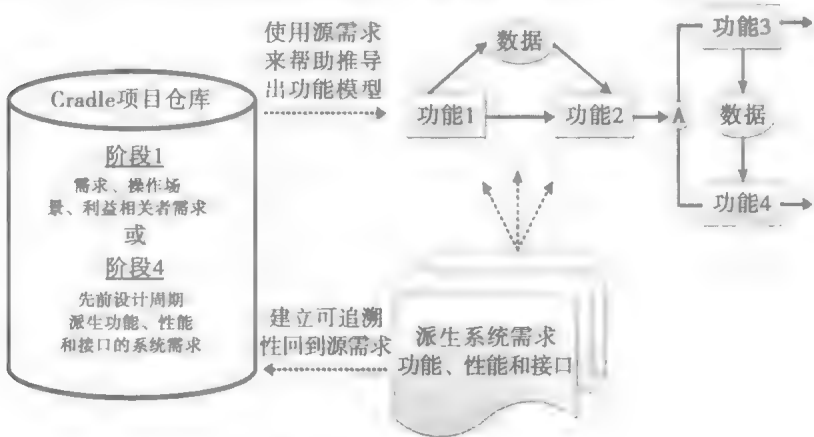


图 6.21 所需函数和 I/O

- 两个最常用的功能建模符号是增强的功能流程图 (eFFBD) 和 UML/SysML 活动图。在这个例子中，使用 eFFBD，如图 6.22 所示。

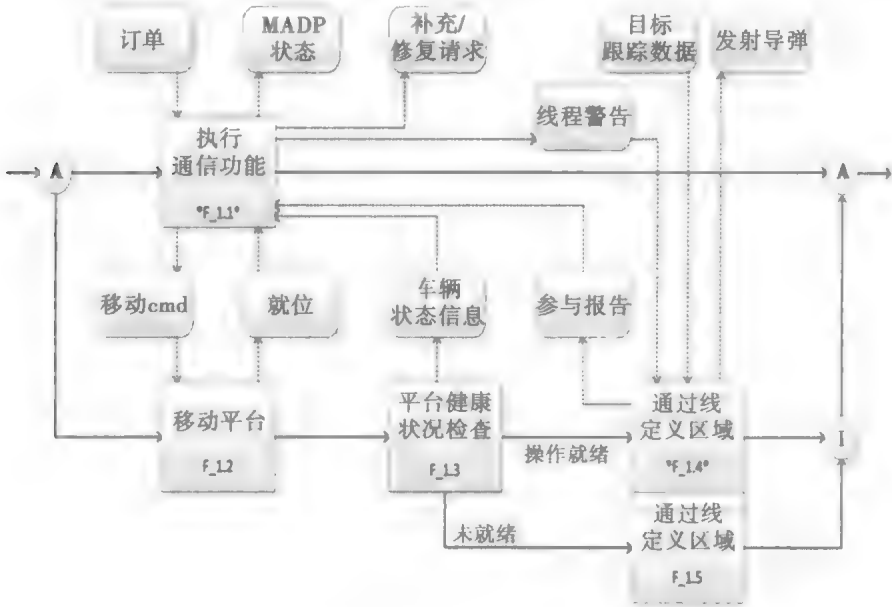
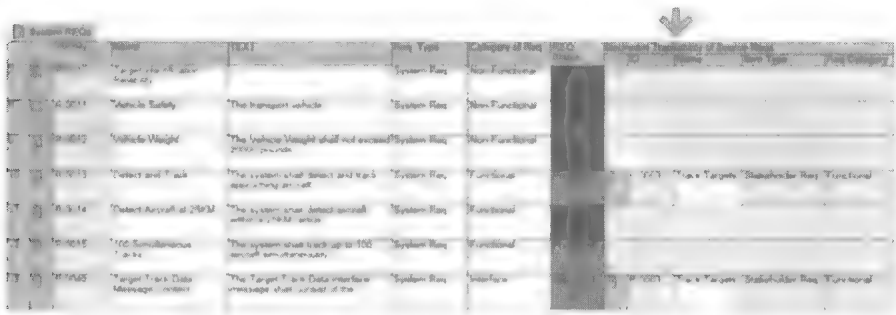


图 6.22 eFFBD 示例

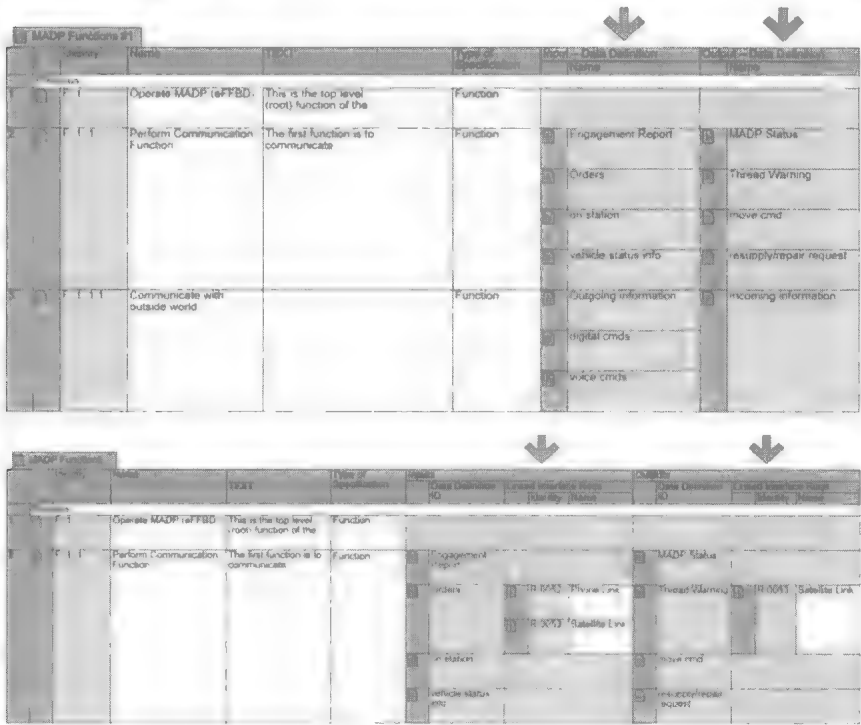
- 活动 4.2——创建功能需求并链接到函数。
  - 将每个功能链接到适用的现有需求（利益相关者或系统），或者将新的派生系统需求创建并链接到该函数。可追溯性表（如下所示）可用于验证每个功能是否与一个或多个需求相关联。团队必须检查表中的数据，以确保存在适当的可追溯性。详见 3SL (2014)。
- 活动 4.3——建立对源需求的追溯性。所有派生的需求必须追溯到一个有效的源需求（系统或利益相关者）。如果无法识别源，则确定派生的请求是否应该被删除。如果确定派生的需求是有效的，则确定是否需要源材料进行修改以解决缺少的源需求。后面的跟踪报告的示例如下图所示：

272



ID	Name	TEXT	Type	Category	Traceability
1.1.1	Vehicle Safety	The transport vehicle	System Req	Non-Functional	
1.1.2	Vehicle Weight	The vehicle weight shall not exceed 2000 pounds	System Req	Non-Functional	
1.1.3	Detect and Track	The system shall detect and track objects in the air	System Req	Functional	
1.1.4	Detect Aircraft at 200M	The system shall detect aircraft within a 200M radius	System Req	Functional	
1.1.5	100 Simultaneous	The system shall track up to 100 aircraft simultaneously	System Req	Functional	
1.1.6	Target Track Data	The Target Track Data interface	System Req	Interface	

- 活动 4.4——创建和链接接口需求到数据定义
  - 功能模型中的逻辑 I/O 有助于导出和验证阶段 5 中的系统元素之间的接口，并有助于创建接口需求。Cradle 自动创建以下各种功能 I/O 表，以便轻松查看需要链接到适当接口需求的接口信息。下图中的第二个表格显示了用户创建和链接新接口需求的示例。



ID	Name	TEXT	Type	Data Definition
1.1.1	Operate MADP (eFFBD)	This is the top level (root) function of the	Function	
1.1.2	Perform Communication Function	The first function is to communicate	Function	
1.1.3	Communicate with outside world		Function	

ID	Name	TEXT	Type	Data Definition	Data Definition
1.1.1	Operate MADP (eFFBD)	This is the top level (root) function of the	Function		
1.1.2	Perform Communication Function	The first function is to communicate	Function		
1.1.3	Communicate with outside world		Function		

273

- 活动 4.5——分解函数。
  - 在阶段 3 中，一旦将当前设计周期的主要系统元素分解为其组成部分（层次结构中

的一个级别), 则应对阶段4第一部分中定义的每个顶级函数进行评估, 以查看是否必须将其分解成可以唯一地分配给其中一个组件的子功能。实际分配过程发生在阶段5。图6.23说明了这个概念。

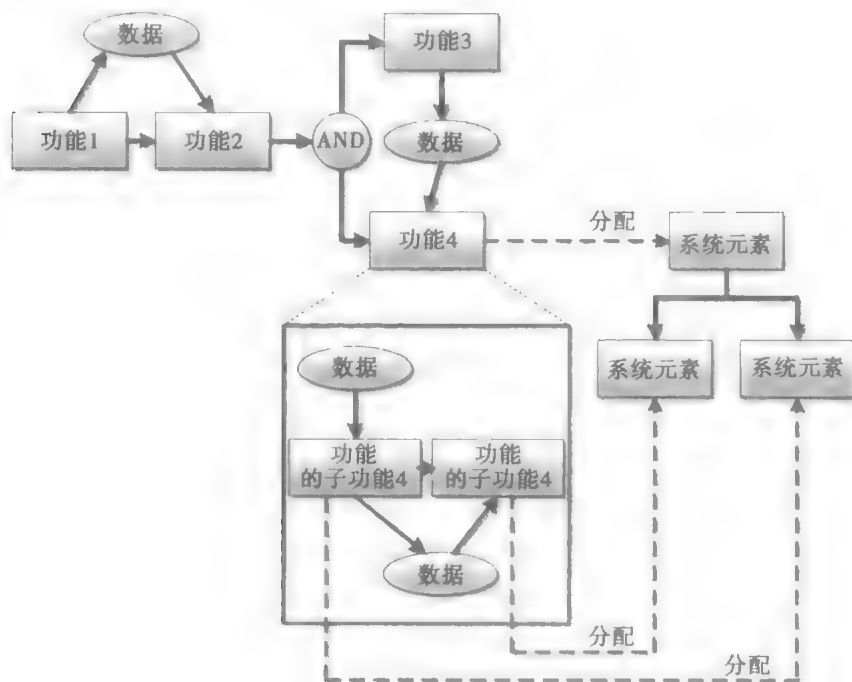


图 6.23 独特分配的子功能

● 活动 4.6——建立功能需求流程并链接到函数。

- 每当函数分解时, 必须评估与父函数相关联的需求, 以确定它是否可以不变地流向子函数, 或者是否也必须分解, 如图6.24所示。

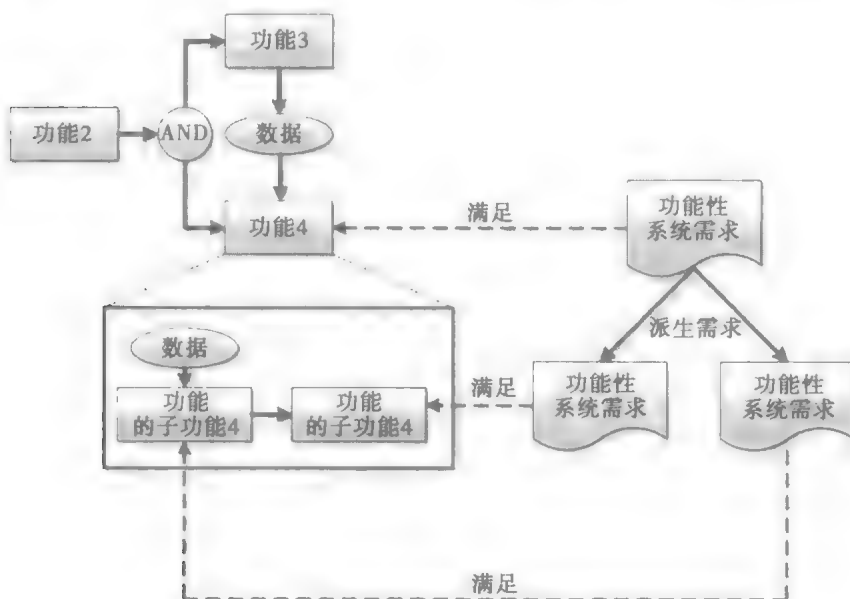


图 6.24 分解子功能

### 阶段5：将功能分配给系统和系统元素

在这个阶段，将功能和 I/O（在阶段 4 中识别的）分配给不同的系统元素和物理接口。在图 6.25 中，三种系统需求（功能、非功能和接口）直接或间接地连接到满足要求的系统要素

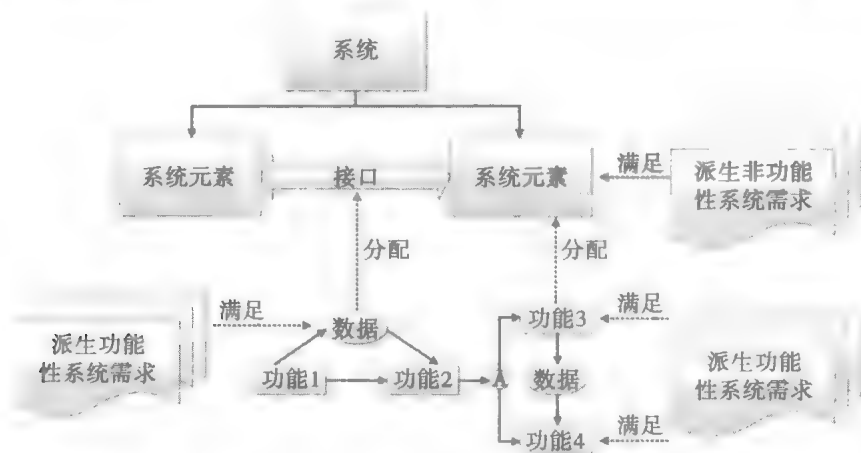


图 6.25 将函数分配给系统和系统元素

本阶段的活动如下:

- **活动 5.1——将功能分配给系统元素。**
  - 将当前设计周期的主系统元素分配给在阶段 4 中定义每个顶级函数。这提供了要由系统元素执行的所需函数的列表。这些功能通过“分配”交叉引用链接类型链接到系统元素。
  - 将阶段 4 中定义的每个叶级别函数分配给主系统元素的子元素之一。详见 3SL (2014)。
- **活动 5.2——定义系统元素之间的物理接口。**
  - 识别分配给不同系统元素的函数之间的 I/O。所识别的信息应分配给系统元素之间的物理接口。以下 Cradle 查询视图使用户识别可以在系统元素之间跨越物理接口的 I/O 数据定义 (DD)。在下图中, 注意“目标跟踪数据”(Target Track Data) 在传感器系统和火力控制系统之间的流动; 因此, 应该定义一个物理接口来实现这种信息流。

- 将当前设计周期的主系统元素分配给在阶段 4 中定义的每个顶级函数。这提供了要由系统元素执行的所需函数的列表。这些功能通过“分配”交叉引用链接类型链接到系统元素。
- 将阶段 4 中定义的每个叶级别函数分配给主系统元素的子元素之一。详见 3SL (2014)。

- 将阶段 4 中定义的每个叶级别函数分配给主系统元素的子元素之一。详见 3SL (2014)。

- **活动 5.2——定义系统元素之间的物理接口。**
  - 识别分配给不同系统元素的函数之间的 I/O。所识别的信息应分配给系统元素之间的物理接口。以下 Cradle 查询视图使用户识别可以在系统元素之间跨越物理接口的 I/O 数据定义 (DD)。在下图中, 注意 “目标跟踪数据” (Target Track Data) 在传感器系统和火力控制系统之间的流动; 因此, 应该定义一个物理接口来实现这种信息流。

- 识别分配给不同系统元素的函数之间的 I/O。所识别的信息应分配给系统元素之间的物理接口。以下 Cradle 查询视图使用户识别可以在系统元素之间跨越物理接口的 I/O 数据定义 (DD)。在下图中, 注意 “目标跟踪数据” (Target Track Data) 在传感器系统和火力控制系统之间的流动; 因此, 应该定义一个物理接口来实现这种信息流。

System Element ID		System Element Name	Type of Specification	Allocated Functions and MO			
				Function ID	Name	Input DO (Interface Info) Name	Output DO (Interface Info) Name
2	Phy 1.1	MADP Physical Model (PAD)	System	F.1	MADP Functional Model (eff FBO)		
3	Phy 1.1.1	Sensor System	System_Element	F.1.1	Detect and Track Incoming Aircraft		Target Track Data
4	Phy 1.1.2	Fire Control System	System_Element	F.1.3	Perform Health and Status		vehicle status info
				F.1.4	Defend Area Against Threats	Target Track Data	Engagement Report
				F.1.4.2	Identify Friend or Foe		
				F.1.4.4	Kill Assessment		Engagement Report
5	Phy 1.1.3	Communication System	System_Element	F.1.1	Perform Communication Function	Engagement Report	MADP Status
					Orders		Thread Warning
					on station		move cmd
					vehicle status info		resupply/repair request

■ 主要系统元素的子元素的物理模型也可用于识别系统元素之间的接口

- 活动 5.3——将非功能性需求分配给系统元素 在阶段 3，确定了主系统元素的物理特性，并制定了非功能性需求 在这个阶段，这些非功能性需求是必要的，并将需求向下传递到系统元素的从属元素 需求 R.55 和 R.56 来自需求 R.12 并与子系统元素相关联。详见 3SL (2014)。
- 活动 5.4——执行试用分配 为了获得正确的设计解决方案，必须通过执行试用分配来平衡性能、复杂性和风险 这意味着更改分配或更改功能模型 I/O 流程以获得平衡的设计解决方案。

276

### 阶段 6：分析系统需求并执行验证计划

- 活动 6.1——需求分析 在这个阶段，在阶段 3 至阶段 5 推导的系统需求应该分清晰度、完整性、一致性并且追溯到前一个设计周期结束时建立的利益相关者或系统需求。
- 活动 6.2——确定验证目标 确定用于验证每个系统需求的验证目标 每个验证目标都应确定完成验证活动所需的方法、设施、设备和资源 验证目标与要验证的系统需求相关。
- 活动 6.3——建立需求基线 在每个设计周期结束时建立需求基准

### 阶段 7：为系统和系统元素生成文档

- 活动 7.1——生成交付文件。
  - 使用 Cradle 的文档发布者来规范项目文档的外观和风格。
  - 所有可以从数据存储库生成的文档应使用文档发布者生成，而不是手工制作
- 活动 7.2——生成数据包 应从项目库中的数据创建数据包，以支持每个项目的审查 这些数据包应该从数据存储库中生成，而不是手工制作。

### 阶段 8：进行系统验证和确认 (V&V) 跟踪

捕获数据库中的每个 V&V 活动的状态，并追溯到受影响的需求和操作场景 可追溯性通过可能需要修改的设计解决方案链接来识别这些需求。

- 活动 8.1——确保验证可追溯性 验证过程的目的是确认系统满足指定的设计需求（即系统要求）。
- 活动 8.2——确保确认可追溯性 确认过程的目的是提供客观证据，证明系统在使用时提供的服务符合利益相关者的需求，从而在其预期的操作环境中实现系统的预期用途。

## 6.2.3 INCOSE 系统工程手册 (3.2.2 版本) 可追溯性

277

本节包含一个模型，显示了 6.2.1 节和 6.2.2 节中描述的需求定义和管理过程的八个阶段之间的可追溯性以及“INCOSE 系统工程手册”（3.2.2 版本）中描述的技术流程活动 如图 6.26 所示，手册流程符合 ISO/IEC 15288:2008 生命周期过程

6.2.1 节和 6.2.2 节描述的过程活动可以追溯到 INCOSE 手册中 4.1 节、4.2 节、4.3 节、4.6 节和 4.8 节的内容。可追溯性如表 6.6 所示。



图 6.26 生命周期过程

278

表 6.6 可追溯到 INCOSE 手册中 4.1 节、4.2 节、4.3 节、4.6 节和 4.8 节内容的 Cradle 过程活动

INCOSE 手册		Cradle 8 个阶段需求定义和管理	
章节	活动描述	活动编号	活动描述
4.1	利益相关者需求定义过程		
	目的是定义一个系统的需求，该系统可以在定义的环境中提供用户和其他利益相关者所需的服务。它确定涉及系统吞吐量、系统生命周期以及利益相关者的需求和期望的利益相关者或利益相关者类。它分析并将其转化为一组共同的利益相关者需求，表达系统将其运行环境进行的预期交互，并以此作为对每个结果操作服务进行验证的参考。		
4.1.2.1	识别用户和利益相关者	1.1	定义项目范围
4.1.2.2	定义需求	1.1	定义项目范围
4.1.2.3	捕获需求	1.4	创建利益相关者需求
		1.6	设计约束
4.1.2.4	初始化需求数据库	1.5	规划系统验证
		1.7	捕获词汇表项目
4.1.2.5	建立运营理念	1.2	定义用例
		1.3	制定操作理念
4.1.2.6	生成系统需求文件	7.1	生成可交付的文档



(续)

INCOSE 手册		Cradle 8 个阶段需求定义和管理	
章节	活动描述	活动编号	活动描述
4.2	需求分析过程		
	需求分析过程的目的是将利益相关者需求驱动的观点转换为所需产品的技术视图，从而交付这些服务。这个过程构建了将满足利益相关者需求的未来系统的代表，并且在约束允许的情况下，并不意味着任何具体的实现。它产生了可衡量的系统要求，从供应商的角度来看，它具有什么样的特征，并以何种规模来满足利益相关方的需求。它确定涉及系统吞吐量、系统生命周期以及利益相关者的需求、期望和利益相关者或利益相关者类。它分析并将其转化为一组共同的利益相关者需求，表达系统将对其运行环境进行的预期交互，并以此作为对每个结果操作服务进行验证的参考。		
4.2.2.1	识别用户和利益相关者	6.1	需求分析
		6.2	验证计划
		6.3	需求基线
4.2.2.2	定义需求	6.1	需求分析
4.2.2.3	捕获源需求	2.1	创建上下文图
		2.2	识别外部接口
4.2.2.4	初始化需求数据库	4.1	开发主系统元素的功能模型
		4.5	
		4.6	分解功能，建立功能需求流和功能链接
4.2.2.5	建立运营理念	3.2	定义非功能性系统需求
4.2.2.6	开发规范树和规范	3.1	分析系统元素源信息
		3.2	分析系统元素源信息
		3.3	定义候选子系统元素
4.2.2.7	分配需求并建立可追溯性	4.2	创建功能需求并链接到函数
		4.3	建立对源需求的追溯性
4.2.2.8	生成系统规范	7.1	生成可交付的文档
4.3	架构设计流程：		
	架构设计过程的目的是合成满足系统需求的解决方案。该过程封装并定义了解决方案的领域，表示为一组可管理的、概念上的、最终可实现的比例问题。它根据系统的技术和商业需求和风险，确定并探索一种详细的实现策略。从这一点来看，一个架构设计解决方案是根据系统组成的系统元素集的需求来定义的。从这个过程中产生的特定设计需求是验证实现的系统和设计装配和验证策略的基础		
4.3.2.1	架构设计理念	5.1	将函数分配给系统元素
		5.2	定义系统元素之间的物理接口
		5.3	将非功能需求分配给系统元素
		4.4	创建和链接接口需求到数据定义

(续)

INCOSE 手册		Cradle 8 个阶段需求定义和管理	
章节	活动描述	活动编号	活动描述
4.6	验证过程：	8.1	系统验证和确认（V&V）可追溯性
	验证过程的目的是确认系统所满足的指定设需求		
	此过程提供了所需的信息，以实现纠正系统中的不符合项或对其进行的操作。		
4.8	确认过程：	8.1	系统验证和确认（V&V）可追溯性
	验证过程的目的是提供客观证据，证明系统在使用时提供的服务符合利益相关者的需求，在预期的操作环境中实现其预期用途。		
	该过程进行比较评估，并确认利益相关者的需求得到正确定义。在确定差异的地方，记录并指导纠正措施。系统验证由利益相关者批准。		

281

6.3 软件工程简介

软件越来越复杂，需要使用不同的系统视图，以确保在软件工程中高效地开发信息物理系统（CPS）的高质量软件。因此，可以引入软件工程作为软件的设计、开发和维护的工程学习和应用（IEEE 1990）。软件工程的正式定义包括：

- 采用系统的、有条不紊的、可量化的方法来开发、运行和维护软件，即指导计算机处理器执行特定操作的任何一套机器指令（IEEE 1990）；
- 涉及软件生产各个方面的工程学科（Sommerville 2007）；
- 建立和使用健全的工程原则，以经济地获得可靠的软件，并在实际机器上有效地工作（Hamilton 1972）。

282

创建软件工程学科是为了解决软件质量差，获得超越时间和预算的项目控制，并确保系统地、严格地、可衡量地、按时、按预算和规格地制定软件。工程已经解决了所有这些问题，因此，工程中使用的相同原理可以应用于软件。当时，将普遍缺乏实践的软件视为软件危机（Sommerville 2007；Naur and Randell 1968）。

随着程序和计算机成为商业世界的一部分，它们的发展摆脱了定制工艺的世界，并成为一个商业企业。软件购买者越来越要求在时间和预算范围内建立高质量的产品。当时的许多大型系统被视为绝对的失败，要么被抛弃，要么没有带来任何预期的好处。因此，发生软件危机是因为确定了软件开发过程中的一些根本问题（http10 2015）：

- 即使在进行了进一步的投资之后，软件也常常没有完成；
- 从完成的软件中删除缺陷和错误，使其可用的工作量往往需要相当长的一段时间，通常比开始编写时花费的时间更多；
- 软件的功能不符合终端用户的需求；
- 一旦创建，软件几乎是不可能维护的，开发人员理解他们编写的内容的能力随着时间的推移而迅速减少。

幸运的是，人们已经意识到软件危机的存在，并激发了全球范围内的流程改进运动。软件行业的领导者认为，遵循一个正式的软件过程，会带来更好的产品、更高效的团队和个人、降低成本并且提高士气。同时，软件工程在过去几年中已经从计算机工程学发展成为单独的学科。

IEEE 计算机学会致力于正式化该领域，已经开展了若干活动，以提高软件工程的专业水平，例如为软件开发人员建立认证要求。为了配合这项工作，计算机学会（CS）和国际计算机学会（ACM）的联合工作组最近成立了软件工程专业的一个关键：道德准则。经过广泛的审查过程后，IEEE-CS/ACM 软件工程道德与专业实践联合工作组在去年推荐的《软件工程道德与专业实践规范》的 5.2 版本被 IEEE 计算机协会和 ACM 采用

《软件工程道德与专业实践规范》作为教学和实践软件工程的标准，记录了软件工程师的道德和专业义务。该守则指示从业者关于标准社会期望他们遇到的、关于他们的同龄人所争取的、以及彼此期待的内容。此外，该规范还向公众通报了该行业重要的责任。由 CS 和 ACM 两个主要的国际计算协会采用的道德规范旨在作为不断发展的软件工程专业的成员指南。该规范是由一个多国工作团队开发的，其中包括来自工业界、政府职位、军事设施和教育专业的人员（Gotterbarn et al. 1999）。

在其简洁版本中，准则总结了高级抽象的愿景。完整版本中包含的条款提供了这些愿望如何改变我们作为软件工程专业人员的方式的示例和细节。没有愿景，细节就变得墨守成规，单调乏味；没有细节，愿景会变得夸大但空虚；愿景和细节会形成一个有凝聚力的准则。

根据准则，软件工程师应承诺将软件的分析、规范、设计、开发、测试和维护作为有益和被尊重的专业。依照对公众健康、安全和福利的承诺，软件工程师应遵循以下八项原则

- (1) 公众：软件工程师应与公众利益一致；
- (2) 客户和雇主：软件工程师应以符合公共利益以及客户和雇主的最佳利益的方式行事；
- (3) 产品：软件工程师应确保其产品和相关修改符合最高专业标准；
- (4) 判断：软件工程师应保持职业判断的完整性和独立性；
- (5) 管理：软件工程经理和领导者应认可并促进软件开发和维护管理的道德方法；
- (6) 职业：软件工程师应当按照公共利益提升职业的诚信和声誉；
- (7) 同事：软件工程师应公平对待并支持同事；
- (8) 自我：软件工程师应参与终身学习（Gotterbarn et al. 1999）。

从上述可以得出软件工程项目的初稿，其中包括以下活动：

- 基本项目框架，包括想法、愿景和概念；
- 项目章程，包括价值观和规则；
- 商业案例，包括成本和收益；
- 选择适用的方法，这可以是瀑布方法或敏捷方法；
- 供应范围，包括对象和模块；
- 具有期限和内容的发布和项目计划；
- 项目组织，包括组织计划和职责。

所选择的方法对软件工程项目具有决定性的影响，因为它决定了解决方案将如何开发，项目阶段如何计划，以及项目进度如何或应该如何度量。软件工程中最常用的两种方法如下所示。

- 瀑布法或 V 模型：软件开发过程中使用的顺序设计过程，其中进度是稳步向下流动的（例如瀑布）。
- 敏捷方法：帮助团队通过增量、迭代的工作节奏（称为冲刺）来应对不可预知性。

### 6.3.1 V 模型

V 模型是用于在各种可靠阶段组织软件开发过程的软件的线性过程模型。其结果总是作为

下一阶段的约束目标 每个阶段必须完成，以便下一个阶段可以开始 为此，生成的每个阶段都是详细文档或程序的结果 图 6.27 显示了 V 模型的主要结构

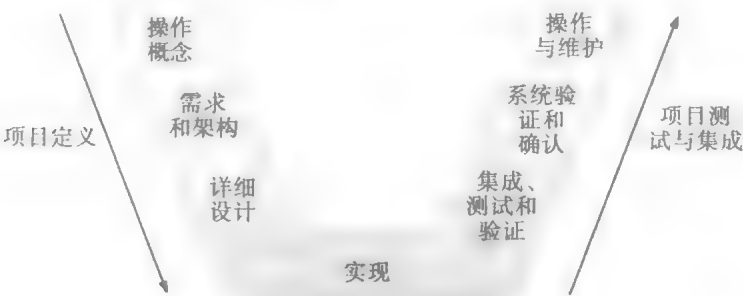


图 6.27 软件工程过程的 V 模型

可以认为 V 模型是具有上一阶段结果的瀑布模型的增强 V 模型的阶段包括以下内容：

- 需求定义和需求分析。
- 功能系统设计，也称为：
  - 功能规范；
  - 软件系统需求；
  - 规格表。

这些从黑盒的角度描述了软件系统如何实现用户需求 还包括对诸如图形用户界面（GUI）和可能到其他外部接口的接口的描述 GUI 描述包括 GUI 屏幕的描述，如何在屏幕中浏览以及软件系统如何对用户输入做出反应 功能软件系统设计没有描述如何在技术上实现软件系统来实现这种黑盒行为 黑盒视图中包括：

- 性能、响应时间和资源消耗；
- 鲁棒性、过载行为、安装错误、更新功能、支持的平台等。
- 技术系统设计（也称为体系结构）描述了如何在技术上实现软件系统 体系结构的各个方面包括编程语言和所使用的技术、组件和类图以及数据库模式。因此，体系结构必须设计为：
  - 实现软件系统需求，要求软件系统的黑盒视图满足需求，包括性能要求和软件系统的可移植性；
  - 软件系统是可维护的、可测试的和可修改的；
  - 组件及其接口是可识别的。

架构通常由多个视图描述，包括

- 具有组件和类图的静态视图；
- 动态视图、运行流程和工作流的描述；
- 部署视图，描述了软件系统和组件（dll、jar、exe、服务器等）的安装。
- 实现、编程、编码。
- 模块测试。
- 集成测试。
- 功能和系统测试。
- 验收测试。

V 模型和瀑布模型的重要区别是，在 V 模型中测试可以在开发过程中尽可能早地定义 在

这一点上，必须对术语确认和验证作出区分。

- 确认：确定是否符合需求，也就是说，如果做了正确的事情，用户是否达到了他的目标；
- 验证：确定软件是否按指定的方式开发，例如，如果 GUI 按照指定的要求并按照用户需求响应用户操作，验证是指软件系统而不是使用需求。

由于验证仅在开发过程结束时进行，所以存在风险，直到结束时需求中的错误才会被检测到。与迭代过程模型相比，这是一个主要的缺点。此外，V 模型要求这些需求保持一致。一旦需求分析阶段完成，V 模型不允许更改需求。然而，这对于很少的项目是实用的。据报道，80% 的项目遭受不稳定或不断增长的需求，并且大多数项目也受到时间的压力。

总而言之，V 模型代表了一个真实的物理项目的顺序，例如盖房子。一开始，先铺好地基，然后建造墙壁，最后建造屋顶。从这个例子可以清楚地看出，后来发现的错误规范、修复将越困难并且越来越昂贵。如果在项目的后期阶段检测到虚假的假设或模糊性，终止项目通常是减少损害的唯一方法。对于需要完整运行模型的广泛开发来说，这是特别有问题的，这可能需要几年时间。在设计阶段结束时，对变化的需求做出响应已经太晚了。

### 6.3.2 敏捷软件开发方法

敏捷软件开发宣言 (Beck et al. 2001) 也称为敏捷宣言，于 2001 年推出，它首先阐述了敏捷开发的基本概念。其中一些作者成立了敏捷联盟，这是一个非营利组织，根据宣言的价值观和原则促进软件开发。Jim Highsmith 以敏捷联盟的名义介绍宣言：

287

敏捷运动不是反方法论；实际上我们中很多人都想恢复方法论的可信度。我们想恢复平衡。我们接受建模，但不是为了在尘土飞扬的企业存储库中编写一些图表。我们拥抱文档，而不是数百页的从未维护并且很少使用的书籍。我们计划，但在变化的环境中认识到规划的局限性。将 XP（极限编程）或 SCRUM 或任何其他敏捷方法的倡导者称为“黑客”的人都不了解黑客术语的方法和原始定义 (Highsmith 2001)。

因此，对于敏捷软件开发的宣言项目的含义如下 (http11 2015)

- 个人与互动：在敏捷开发中，自组织和动机是重要的，例如协同定位和配对编程等相互作用；
- 工作软件：工作软件比在会议中向客户展示文档更有用和更受欢迎；
- 客户合作：在软件开发周期开始时，不能完全收集需求，因此，持续的客户或利益相关者的参与是非常重要的；
- 响应变化：敏捷开发侧重于对变革的快速响应和持续发展。

因此，在这种软件工程方法中，规划不太详细，从而产生了更大的灵活性，也称为敏捷性。敏捷软件开发方法不需要完整的需求规范，而是要对要实现的模块进行概述。其规划可以在项目设置中完成。然后，指定最重要的顺序迭代；此后，实现和集成软件的其他部分。该序列在开始时不是固定的，而是适应于当前的知识状态。软件在每次迭代后进行测试，因此它是可执行的。在某些情况下，发布软件；在其他情况下，只在所有迭代执行之后发布。

敏捷联盟推出了十二项敏捷软件开发原则来补充敏捷宣言，如下所示 (http12 2015)：

- 最重要的是通过及早、持续地交付有价值的软件来满足客户需求；
- 欢迎不断变化的需求，即使在发展的晚期，敏捷过程利用变更为客户创造竞争优势；
- 频繁地交付工作软件，从几周到几个月，优先选择较短的时间范围；
- 业务人员和开发人员必须在整个项目中共同工作；

- 围绕积极的个人建立项目，给他们所需的环境和支持，并相信他们能完成工作；
- 向开发团队内部传达信息的最有效的方法是面对面交谈；
- 工作软件是进展的主要衡量标准；
- 敏捷过程促进可持续发展，提案人、开发人员和用户应能够无限期地保持恒定的速度；
- 持续关注技术的卓越性和良好的设计，提高敏捷性；
- 简单，最大限度地完成未完成的工作是至关重要的；
- 最好的架构、需求和设计都来自于自组织团队；
- 每隔一段时间，团队就会反思如何变得更有效率，然后相应地调整其行为。

敏捷软件开发方法包括（http11 2015）：

- 敏捷建模；
- 敏捷统一过程（AUP）；
- 动态系统开发方法（DSDM）；
- 核心统一过程（EssUP）；
- 极限编程（XP）；
- 特征驱动开发（FDD）；
- 开放统一过程（OpenUP）；
- Scrum；
- 速度跟踪。

6.3.3 V模型与敏捷软件开发方法的比较

选择适当的开发方法对于相应的软件是至关重要的。要回答的问题包括“如何组织项目”和“谁参与项目”，软件开发方法不仅取决于客户的期望，而且取决于潜在的项目复杂性，这可以从表 6.7（Rusche 2013）中的 V 模型和敏捷软件开发方法的比较中看出。

表 6.7 六西格玛质量功能开发矩阵

	V 模型	敏捷方法
需求	如果至少有 80% 的需求是唯一的，并就其优先次序达成一致，那么就应该选择 V 模型。对于较小的项目，这是常有的情况	核心功能是已知的，但是描述整体的系统或以前的优先级是很困难的，那么选择敏捷方法，对于明显不清楚的项目，这是常有的情况
项目进度	功能和技术需求可以按照开发的项目进度实施。计划是在每个项目阶段控制和更新的，但并没有从根本上质疑或修改	项目进度本身和所有日期都是固定的；然而，迭代的内容不是固定的
集成	单个模块在几天或几周内集成，然后进行测试	在每次迭代结束时进行集成。单一费用，风险较低，但资源投入更长时间
应用	新软件不是在绿色领域创建的，而是在很大程度上基于现有的功能。因此，交货的范围大部分是事先已知的。通常情况下，旧的解决方案得到增强。	项目是从零开始创建的。开发了新功能，交货范围很大程度上是未知的。不是生成概念表，而是在几周内开发出真正的软件，每次迭代都可以针对所需的应用程序进行增强
功能、预算	规格确定后，对初始报价进行修改，并将其功能与预算相适应；交付的内容是由商定的价格决定的	由于功能在实现中可能有很大差异，所以确定了软件的最小范围，生产产品的时间是一致的

## 6.4 信息物理系统软件设计需求

由于系统级处理复杂设计的能力有限,信息物理系统(CPS)的设计受到了阻碍。妨碍系统设计的因素有很多,例如大型复杂系统缺乏形式化的高逼真模型、对重要系统组件的性能测量方法不足以及科学基础不足。设计方法的一个关键因素是组合性和模块化。CPS中的组合性受到软件和系统工程的强相互依赖性的影响,并且通常受到系统设计不足的限制。

290

如3.3.1节所述,软件需求可以作为软件必须提供的服务的描述以及软件必须运行的限制来引入。从更广泛的角度来看,可以说软件需求范围从服务或约束的高级抽象语句到更详细的功能规范。

为了介绍不同类型的软件需求,我们遵循htp13(2015)中描述的概念。

- 用户需求:

- 为客户撰写的;

- 声明是用自然语言编写的,包括软件系统应提供的服务及其操作限制。

使用自然语言时可能出现问题的区域:

- 歧义——作者和读者可能不会以相同的方式解释词汇;
- 过于灵活——同样的事情可以用不同的方式表达;
- 需求混合——不同的要求可以混合在一起;
- 缺乏模块化——自然语言不足以构成软件需求。

自然语言的替代方法是:

- 图形符号——图形语言辅以文本注释,常用于定义功能需求;
- 数学/形式规范——数学概念,如有限状态机或集合,明确的规范有助于减少客户和承包商之间的争论,但客户往往不了解数学/形式规范。

- 软件需求:

- 客户和承包商之间的合同;

- 详细说明软件服务的结构化文件。

- 软件规范:

- 为开发人员编写的;

- 详细的软件描述,可以作为设计和实现的基础。

除了上述需求之外,功能性、非功能性和与领域相关的需求在软件工程中也非常重要。

- 功能性需求:

- 软件应提供的服务声明,软件如何对特定输入做出响应,以及软件在特定情况下的行为。

- 非功能性要求:

- 对软件必须保证的服务或功能的约束,例如时间限制、对开发过程的约束以及要编译的标准。

- 领域需求:

- 反映应用领域特征的软件应用领域的结果;

- 可以是功能性或非功能性。

291

最后,将完成一份需求文档,其中包含以下内容。

- 官方声明软件开发人员需要什么;

- 定义和规范需求:

- 指定外部系统行为;

- 指定实现的约束；
- 易于更改，但必须对变化进行管理；
- 作为维护的参考工具；
- 记录系统的生命周期；
- 描述对突发事件的响应。

需求文档不是设计文档；它必须说明软件应该做什么，而不是如何做。

所谓的软件需求规格说明书（SRS）是 IEEE 标准，首次发布于 ANSI/IEEE 830 - 1984 标准。最新版本目前是 IEEE Std 29148 - 2011。使用 SRS，IEEE 已经定义了如何建立软件需求规范文档。因此，确定了文件的有关部分。本文档主要分为两部分（http://14.2015）

- C - 需求（客户需求）：范围与规格表相当；
- D - 需求（开发需求）：范围与需求规格相当。

C - 需求从客户和终端用户的考虑角度需求。D - 需求描述了开发需求，从开发者的角度来看，与客户的观点相反。关于需求，从客户的角度来看是指所需软件的定性和定量定义。理想情况下，这样的规范包括在实践中详细说明计划使用的目的，以及软件所需的功能。在此，应考虑以下技术方面的问题。

- 软件能做什么？
- 该软件将在多大程度上以及在何种条件下使用？

因此，软件需求规范遵循 IEEE 标准，并且包括至少三个应满足的要点。在实践中，这经常被修改。典型的结构可能如下所示：

- 软件产品的名称；
- 制造商的名称；
- 文档和软件的版本日期。

292

#### (1) 介绍

- (A) 文件的目的
- (B) 软件产品的覆盖范围
- (C) 术语或缩写的解释
- (D) 参考其他资源或来源
- (E) 概述文档的构建方式

#### (2) 软件产品的一般说明

- (A) 产品前景（对于其他软件产品）
- (B) 产品特点（总结和概述）
- (C) 用户特征（有关预期用户的信息，例如教育、经验、专业知识）
- (D) 限制（适用于开发人员）
- (E) 假设和依赖（影响开发但不限制操作系统选择的因素）
- (F) 需求分配（不可行，转移到较新的版本特征）

#### (3) 具体需求（相对于第 2 点）

- (A) 功能性需求（强烈依赖于软件产品的性质）
- (B) 非功能性需求
- (C) 外部接口
- (D) 设计约束
- (E) 性能需求



- (F) 质量需求
- (G) 其他需求

在实践中这种需求分析中可能出现的困难包括：

- 潜在的利益冲突，即用户的不同目标；
- 技术条件不清楚甚至未知；
- 在设计过程中已经改变了需求或优先级。

总而言之，为了成功实施复杂的软件项目，以下核心流程至关重要：

- 需求分析；
- 原型设计；
- 架构与设计；
- 编程和验证；
- 客户端实现和测试；
- 维护计划。

293

从上图可以看出，这显示了传统的设计方法，一个两阶段的设计方法可能是适当的。第一阶段是做出设计决策的阶段。在随后的第二阶段，尽可能地确定设计错误。由于错误检测存在于相对较晚的阶段，所以用于错误检测的成本可能很高。为了实现对需求分析的早期错误检测，只能使用小型设计逻辑模型，可以很容易地彻底地分析潜在的违规要求。这就导致了一种形式化的需求表示，该约束不允许向前移动，直到证明设计或设计的部分是正确的。因此，由此产生的详细设计以及随后的实现降低了测试对小问题的依赖。这可以用图 6.28 中给出的说明来描述。

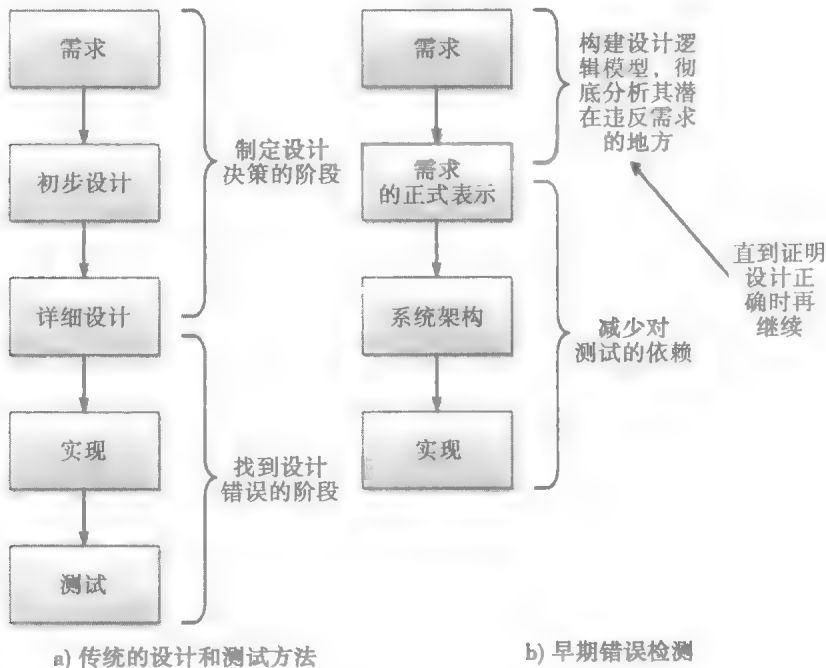


图 6.28 a) 传统的设计和测试方法，b) 早期错误检测

除了图 6.11 中提到的传统设计步骤外，可以总结以下控制实现的相关过程：

- 需求管理；
- 项目管理；

- 质量管理；
- 配置管理；
- 文档；
- 客户培训。

294

为了实现软件解决方案，可以使用以下开发平台示例。

- 在 IMC-AESOP 方法的上下文中使用用例和原型实现的敏捷工具，其设想了面向服务的架构（SOA）的监督控制和数据采集/分布式控制系统（SCADA/DCS）基础架构，不仅在水平层面，例如在协作设备和系统之间，而且在位于企业软件架构不同层次的系统之间的垂直层次上，可实现交叉层面面向服务的协作（Colombo et al. 2014）；
- 在 Apache、Tomcat 和 JBoss 上开发 Java SE/EE/ME；
- 在 Microsoft 平台上使用 C#语言和 .NET 框架进行开发；
- 使用 C++ 开发实时和嵌入式系统以及软件开发工具，例如：
  - Eclipse IDE、MS Visual Studio；
  - Polaron 应用生命周期管理工具；
  - Polaron 需求和测试用例管理；
  - 使用 Apache Maven 和 Ant 进行管理；
  - 使用 JUnit 和 SoapUI 测试工具。

6.5 海域案例研究

案例研究基本上是对特定的集中领域的深入研究，而不是全面的统计调查。因此，它是一种将一个非常广泛的研究领域缩小成一个容易研究的主题的方法。海洋领域有大量潜在的研究课题。海洋领域的主要部分是通往大陆或岛屿的通道的港口。在欧盟（EU）中，74% 的货物通过港口运送。它们对欧盟内部的贸易同样重要：每年 37% 的欧盟内部货运量以及 3.85 亿乘客通过港口运送。

在联盟约 70 000 公里的海岸上经营了 1200 多个商业港口。欧洲是全球最密集的港口地区之一。2011 年，约 37 亿吨货物（超过 60 000 万个商船停靠港）通过欧洲港口过境。批量运输占其中 70%，集装箱占 18%，滚装（Ro-Ro）运输占 7%，其余为其他普通货物。欧盟港口行业在港口行业本身的就业和活动（直接影响）、供应链（间接影响）以及欧盟的经济（诱发影响）方面具有重大的经济影响（http15 2015）。因此，本章的案例研究重点关注海事领域，特别是海事领域的认识。

海事领域定义为海洋或其他通航航道，包括所有与海事有关的活动、基础设施、人员、货物、船舶和其他交通工具。在海域感知（MDA）的情况下，定义为有效地了解可能影响安全、经济或环境的与海事领域有关的任何事项，CPS 在船舶、海港港口、干港口、卡车和火车的集装箱监控方面变得有意义，这是一个非常广泛的研究领域。因此，案例研究仅限于处理容器跟踪和监控的两个应用程序。第一个应用程序涉及对港口和船上集装箱的跟踪和监控，第二个应用程序用于跟踪和监控从海港口到干港运输的集装箱（Möller 2014）。

295

6.5.1 在港口和船舶上跟踪和监测集装箱

这个案例研究的应用具有重要的背景，因为不幸的是，各国每天都面临恐怖主义和走私活动。因此，研究正在进行跟踪和监测的集装箱，无论是在港口还是在船舶上，特别是在全球范围内定期运输的集装箱，以避免恐怖袭击或走私。这些任务必须远程工作。远程工作意味着连

接到运行操作系统的计算机的软件可以从运行操作系统的软件连接到同一网络或因特网中的计算机软件。这允许从远程计算机访问所有工作计算机的程序、文件和网络资源。

可以通过连接到包含所需测量设备的嵌入式系统的蜂窝和卫星移动网络来实现在港口或是在船舶上跟踪和监视集装箱。如文献 (Patterson et al. 2004) 所述, 使用两种不同的方法来跟踪和监测集装箱: 电缆传输和载波传输。在电缆传输的情况下, 四个不同的电缆和插座被策略地放置在容器内, 通过反馈布尔值来测量容器的压缩和温度。载波传输方法使用位于容器中的调制解调器并发送允许监视容器状态的频率。

如文献 (Patterson et al. 2014) 所述, 这些方法不具有成本效益, 需要大量的设置时间。因此, 无线通信更适合于本地和远程跟踪和监视容器。本地跟踪和监控是基于与容器相连的有源和无源射频识别 (RFID) 标签 (见 4.2 节)。RFID 标签允许向 RFID 读取设备广播信息, 该设备将立即列出容器的项目和规格。本地跟踪使用 ZigBee 应用程序, 主要用于互连网络。ZigBee 是一套用于创建由小型、低功耗数字设备构建的个人区域网络的高级通信协议规范。ZigBee 基于 IEEE 802.15.4 标准。ZigBee 能够以低能量级别广播数据包, 以实现最佳的能源节省, 并且可以通过中间设备的网络传送数据以到达更远的区域, 从而远距离传输数据。ZigBee 的传输速度为 250 kbit/s, 最适合传感器或输入设备的间歇数据传输。因此, 船上的船员使用 ZigBee 网络监控集装箱。陆地上的海事人员通过蜂窝网关和卫星网关对集装箱进行跟踪监测 (Bay et al. 2010)。车载集装箱跟踪和监控系统使用以下方式进行远程集装箱跟踪和监控:

- ZigBee 网络;
- 本地监控中心;
- 蜂窝网关;
- 卫星网关。

陆上集装箱跟踪监测系统采用:

- 蜂窝基站;
- 远程监控中心。

ZigBee 网络可以实现为图 6.29 所示的三种拓扑之一。ZigBee 网络支持点对点通信和星形配置。它为 802.15.4 规范添加了路由协议和分层网络, 该规范解决了允许聚类树和多跳网状网络拓扑的方案。

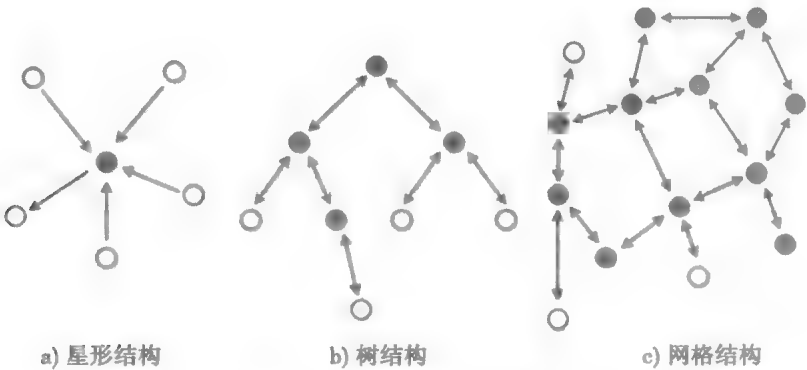


图 6.29 ZigBee 的网络配置

6.5.2 跟踪和监测从海港运输到无水港的集装箱

从海港口的集装箱码头以及海港口的隧道入口运输集装箱, 需要将集装箱装载在载体上,

并将其卸载在无水港口。该装载过程所需的时间以及运输集装箱通过隧道的的时间取决于所使用的运输工具系统。假设集装箱可以立即装入载体或大量的存储容量可用于在非常短的时间内存储集装箱,无论使用何种类型的载体用于海口港口和无水港口的集装箱码头之间的运输,一个集装箱只能从集装箱码头离开到假设的隧道入口进行进一步运输。在通过假设的隧道运输期间,运输船保持最小的安全距离。为安全起见,载体应保持相应隧道中距海闸和无水港两端的最小安全距离。

将模型组件作为位置、实体、到达和处理 (LEAP) 嵌入到模型中。

LEAP 的第一步是位置的定义。位置表示模型中的固定位置,例如集装箱堆放地。在这些模型中,可以对对象进行操作。在图形用户界面 (GUI) 中,它们显示为布局的图标,并且可以安装徽标和广告。这样的显示器指定当前时间内包含了该位置中的动态对象 (实体) 的数量,这使得在模拟运行期间更容易跟踪系统状态。在模型中明确设置位置的容量,这意味着在任何时间点的位置最多可以包含一定数量的实体。

第二步是实体的定义。实体是在模拟运行期间通过模型或模型的一部分移动的对象,并且可以被改变。将速度和大小分配给实体。

第三步是到达的定义。当实体到达模型时定义到达。其决定了将在哪个位置发生、重复发生的距离以及到达的重复次数以及有多少个实体进入每个重复集合的模拟模型。此外,在到达时,可以定义对全局变量的操纵以及属性的初始分配。

在最后一步中,对一个或多个目标位置进行处理,并从一个实体的位置发送到下一个实体。离开一个位置也可以改变实体的类型。此外,可以指定等待时间、检查条件以及操作变量和属性。如果将多个位置指定为目标,则可以根据条件选择一个位置。一个实体可以通过模型的所有可能路径定义。如果实体离开模型,则用“EXIT”指定为目标位置。

以下示例显示子模型输入的属性查询的源代码,其作为处理到达容器中的位置的一部分。

```
Distribution of incoming containers based on attribute origin
#A container arrives... #to location in_load_ship, #if he should be
unloaded from a ship
# Distribution of incoming containers based on attribute origin
    #A Container arrives,
    #at Location in_load_ship,
    # if he should be unloaded from a ship
IF origin = 12 THEN
{
ROUTE 1
}
    #to Location in_to_hh,
    # if he should arrive without shipping in the port of Hamburg
ELSE IF origin < 6 THEN
{
ROUTE 2
}
    #at Location in_to_drport,
    #if his transportation part start in Maschen or Rade ELSE IF
(origin = 6 OR origin = 7) THEN
{
ROUTE 3
}
```

```

        #at Location in_to_cth,
        #if his transportation path start in Magdeburg
ELSE IF origin = 8 THEN
{
    ROUTE 4
}
        #at Location in_to_dd_container,
        #if his transportation part start in Riesel
ELSE IF origin = 9 THEN
{
    ROUTE 5
}

        #at Location in_to_cw,
        #if his transportation path start in Wilhelmshaven
ELSE IF origin = 10 THEN
{
    ROUTE 6
}

```

除了位置、实体、到达和处理之外，仿真软件 ProModel 还提供了属性、网络、资源、宏和全局变量等元素。

- 属性：为位置或实体定义，可以创建为整数或实数。如果为实体定义了属性，则可以为每个单独的实体分配一个值。可以在模拟运行期间更改属性的值。
- 网络：用于构建图形，本质上由节点和路径组成。节点可以具有一定的有限或无限的容量。对于容量有限的节点，必须明确指定其值。那么相关节点可以在任何时候只包含最大值的实体和资源。节点可以链接到位置，如果网络中的实体从一个位置传递到另一个位置，则需要这样的连接。路径连接两个节点，它们具有一定的长度，这是明确指定的。实体和资源都可以通过网络传递。
- 资源：用于模型中将实体从一个位置传输到另一个位置。资源与网络相连，如果一个实体在从一个位置更改为另一个位置时被分配给资源，则在处理中设置该实体。
- 宏：文本中的占位符。宏具有用于标识的名称，其形成占位符，以及在占位符位置的模拟执行期间插入和执行的文本。宏可以定义为场景参数。对于场景参数，可以在开始模拟运行之前更改在模拟期间发生在宏位置的文本。宏是定义 ProModel 中场景的关键。要创建场景，必须至少有一个定义为场景参数的宏。定义为脚本参数的宏为每个待检查场景分配一个值。这种情况发生在模型范围之外，因此模型本身不会被修改。
- 全局变量：可从模型的任何部分访问的变量。这意味着可以查询和更改它们的当前值，允许不同的模型部分相互通信。

也可以首先以多个部分或子模型的形式开发模型，然后将其合并为一个整体模型（Möller 2014）。这个过程称为合并。有两种合并方式。在合并作为模型时，粘贴的模型不会改变。然而，在合并作为子模型时，所有模型元素的名称（如位置和全局变量）都会收到在合并期间指定的前缀或后缀。实体和属性不做更改。子模型只能通过全局变量进行通信，因此在合并之后不需要进行进一步的调整。如果可以在子模型之间移动实体，则将子模型用于此目的；然而，在处理单个规则后，必须更改目标位置。

模型运行可以在屏幕上进行跟踪，因为移动由实体和资源以图形方式表示。此外，如果创建了模型中的表示形式，则可以跟踪全局变量的当前值和各个位置中的实体数量。通过这些，可以很容易地理解模型构建；因此，模拟的黑盒性质至少部分得到了解决。这可以提高决策者

对结果的接受度，而决策者与建模和模拟方法无直接关系。

如 6.5.1 节所述，集装箱跟踪和监控是基于连接到集装箱的有源和无源 RFID 标签（见 4.2 节）。RFID 允许将它们的信息广播到 RFID 阅读设备，它立即列出了容器的项目和规格。如 6.5.1 节所述，ZigBee 能够以低能级广播数据包，以获得最佳的节能效果，并可以通过中间设备网络进行数据远距离传输，将数据传输到更远的区域。因此，陆上运输承包商使用 ZigBee 网络跟踪和监控集装箱。陆上运输承包商通过蜂窝网关和卫星网关跟踪和监测集装箱（Bay et al. 2010）。远程集装箱跟踪和监控系统的架构包含以下用于陆上集装箱跟踪和监控的系统：

- ZigBee 网络；
- 陆上地方监测中心；
- 载体上的蜂窝网关；
- 蜂窝基站；
- 卫星网关；
- 远程监控中心。

从模拟结果可以看出，集装箱从海港口向无水港移动的方式，给出了集装箱及其实际位置的实时依赖情况，也可通过模拟来跟踪和监测。将仿真结果与从 RFID 读取设备获得的实际数据进行比较，以识别容器序列中的改变是否发生，这是意外事件的指示。这种对事件的监控可以表明载体上的容器处于错误的顺序，从而导致扫描整个容器上的容器序列。

6.6 练习

1. 什么是系统工程？

2. 详细描述系统工程流程。

3. 基于模型的设计是什么意思？

4. 举一个基于模型的设计的例子。

5. 术语模型驱动设计是什么意思？

6. 举一个模型驱动设计例子。

7. 生命周期是什么意思？

8. 详细描述生命周期过程。

9. 术语约束是什么意思？

10. 举一个约束的例子。

11. 可靠性分析是什么意思？

12. 举一个可靠性分析的例子。

13. 什么是可维护性？

14. 详细描述可维护性过程。

15. 功能建模的 ICAN 定义是什么意思？

16. 举一个功能建模的 ICAN 定义的例子。

17. 术语 UML 是什么意思？

18. 举一个 UML 的例子。

19. 质量功能部署是什么意思？

20. 详细描述质量功能部署过程。

21. 系统模型是什么意思？

22. 举一个系统模型的例子。

23. 重新评估一词的意思是什么？

24. 举一个重新评估的例子。

25. 术语软件工程是什么意思？

26. 详细描述软件工程流程。

27. 什么是 V 模型？

28. 举一个 V 模型的例子。

29. 什么是敏捷模型？

30. 举一个敏捷模型的例子。

31. 什么是敏捷统一过程？

32. 详细描述敏捷统一过程。

33. 什么是极限编程？

34. 举一个极限编程的例子。

35. 什么是开放式统一过程？

36. 举一个开放式统一过程的例子。

37. 车辆跟踪是什么意思？

38. 详细描述车辆跟踪过程。

39. 项目进度是什么意思？

40. 举一个敏捷方法的项目进度示例。

41. 术语集成意味着什么？

42. 举一个例子说明集成 V 模型。

43. ZigBee 是什么意思？

44. 举例说明 ZigBee 在船舶上的应用。

45. 术语蜂窝基站是什么意思?
46. 举一个蜂窝基站的例子。
47. 远程监控中心是什么意思?
48. 举一个远程监控中心的例子。
49. 术语卫星网关是什么意思?
50. 举一个卫星网关的例子。
51. 术语移动网关是什么意思?
52. 举一个移动网关的例子。
53. 本地监测中心是什么意思?
54. 举一个本地监测中心的例子。

302

## 参考文献

- (ANSI/EIA-632-1998) ANSI/EIA-632-1998 Processes for Engineering a System, Washington, D.C., Electronic Industries Association (EIA), 1999
- (Bahill and Gissing 1998) Bahill, A. T., Gissing, B.: Re-evaluating systems engineering concepts using systems thinking. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, Vol. 28 No. 4, pp. 516–528, 1998
- (Bai et al. 2010) Bai, Y., Zhang, Y., Shen, C.: Remote container monitoring with wireless networking and cyber-physical system. *IEEE Mobile Congress (GMC)*, 2010; doi 10.1109/GMC2010.5634569
- (Baker 2015) Baker, L.: Model-Based Systems Engineering Process with Functional Model Analyses, Presentation AlaSim 2015
- (Beck et al. 2001) Beck, K., Beedle, M., van Bennekum, A., Cockburn, A., Cunningham, W., Fowler, M., Grenning, J., Highsmith, J., Hunt, A., Jeffries, R., Kern, J., Marick, B., Martin, R. C., Melleor, S., Schwaber, S., Sutherland, J., Thomas, D.: Manifesto for Agile Software Development; <http://www.agileAlliance.org>
- (Colomba et al. 2014) Colomba, A. W., Bangemann, T., Karnoukos, S., Delsing, J., Stluka, P., Harrison, R., Jammes, F., Martinez Lastra, J. L. (Ed.). *Industrial Cloud-Based Cyber-Physical Systems*, Springer Publ. 2014
- (CRADLE-7 2014) Requirements Definition and Management Using Cradle, White Paper, 2014
- (Derler et al. 2011) Derler, P., Lee, E. A., Sangiovanni-Vincentelli, A. I.: Addressing modelling challenges in Cyber-Physical Systems. Technical Report UCB/EECS-2011-17, Berkeley, 2011
- (DSMC 1990) Defense Systems Management College: Systems Engineering Management Guide, Washington, DC, U.S. Government Printing Office, 1990
- (EIA&IS/632/1998) Systems Engineering, Washington, D.C., Electronic Industries Association (EIA), 1994
- (Elm 2005) Elm, J. P.: Surveying Systems Engineering Effectiveness. *Proceedings Systems Engineering Conference*, 2005. <http://web.archive.org/web/20070615160805/http://www.splc.net/programs/acquisition-support/presentations/surveying.pdf>
- (Faulconbridge and Ryan 2014) Faulconbridge, R. I., Ryan, M. J.: *Systems Engineering Practice*, Argos Press, Canberra, Australia, 2014
- (Gotterbarn et al. 1999) Gotterbarn, D., Miller, K., Rogerson, S.: Computer Society and ACM Approve Software Code of Ethics. pp. 84–88, *Computer*, 10, 1999
- (Hamelin et al. 2010) Hamelin, R. D., Walden, D. D., Krueger, M. E.: INCOSE Systems Engineering Handbook v.3.2: Improving the Process for SE Practitioners. *INCOSE International Symposium 2010*, Volume 20, Issue 1, pages 532–541. Published online: 4 NOV 2014: DOI: 10.1002/j.2334-5837.2010.tb01087.x
- (Hamilton 1972) Hamilton, M.: *Software Engineering*. In: *Information Processing* pp. 530–538, North-Holland Publ, 1972
- (Haskins 2010) Haskins, C. (Ed.): *Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities*, International Council oo Systems Engineering, San Diego, C. A., 2010
- (Haskins 2006) Haskins, C.: *Systems Engineering Handbook – Version 3*. International Council of Systems Engineering, 2006
- (Higsmith 2001) Higsmith, J.: History Agile Manifesto. <http://agilemanifesto.org/history.html>
- (IEEE-STD-1220-1994) IEEE Trial-Use Standard for Application and Management of the Systems Engineering Process, NewZork, N.J., IEEE Computer Science, 1995
- IEEE Standard Glossary of Software Engineering Terminology. IEEE Standard 610.12-1990, 1990
- (IncoSE 2007) INCOSE Systems Engineering Cost Estimation by Consensus, 2007
- (Johnson et al. 2014) Johnson, M., Randolph, T., Hu, F.: On Modeling Issues in Cyber-Physical Systems. pp. 89-100, Chapter 7, In: *Cyber-Physical Systems*. (Ed.) Hu, F., CRC Press 2014

- (Lake 1996) Lake, J.: Unraveling the Systems Engineering Lexicon. Proceedings of the INCOSE Symposium, 1996
- (Li 2008) Li T.: Systems Engineering Assumptions and Comparison Tests, Graduate Report, TU-Delft, 2008
- (Möller 2014) Möller, D. P. F.: Introduction to Transportation Analysis, Modeling and Simulation, Springer Publ. 2014
- (Naur and Randell 1968) Naur, P., Randell, B.: Software Engineering - Report on a conference sponsored by the NATO, 1968
- (Patterson et al. 2014) Patterson, C., Vasquez, R., Hu, F. : Cyber-Physical Systems: Design Challenges, pp. 15–33, Chapter 2. In: Cyber-Physical Systems. Hu, F. (Ed.), CRC Press, 2014
- (Pollet and Chourabi 2008) Pollet, Y., Chourabi, O.: A formal approach for optimized concurrent System Engineering. Proceed. EngOpt – International Conference on Engineering Optimization, 2008
- (SECM-95-01) Systems Engineering Capability Maturity Model, Version 1.1, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, P.A., Software Engineering Institute, 1995
- (Summerville 2007) Summerville, I.: Software Engineering (8th ed.), Pearson Education, 2005
- (Rusche 2013) Rusche, C. A. (Ed.): The BSI Workbook (in German), BSI AG, 2013
- (Suh 2001) Suh, N. P.: Axiomatic Design: Advances and Applications. Oxford University Press. 2001
- (Tanik and Begley 2014) Tanik, U. J., Begly, A.: An Adaptive Cyber-Physical System Framework for Cyber-Physical Systems Design Automation, pp. 125–140, Chapter 11. In: Applied Cyber-Physical Systems. Suh, S. C., Tanik, U. J., Carbone, J. N., Eroglu, A. (Eds.), Springer Publ. 2014
- (Tarumi et al. 2007) Tarumi, S., Kozaki K., Kitamura, Y., Tanaky, H., Mizoguchi, R.: Development of a Design Supporting System for Nano Materials based on a Framework for Integrated Knowledge on Functioning Manufacturing Process. Proceed. 10th IASTED International Conference Intelligent Systems and Control, pp. 446–454, 2007
- (Togay 2014) Togay C.: Axiomatic Design Theory for Cyber-Physical System. pp. 85–100, Chapter 8. In: Applied Cyber-Physical Systems. Suh, S. C., Tanik, U. J., Carbone, J. N., Eroglu, A. (Eds.), Springer Publ. 2014
- (Valerdi and Wheaton 2005) Valerdi, R., Wheaton, M.: ANSI/EIA 632 As a Standard WBS for COSYSMO, Proceedings 5th Aviation, Technology, Integration, and Operations Conference (ATIO), Arlington, Virginia, 2005
- (3SL 2014) Requirements Definition and Management Using Cradle, White Paper 3SL, November 2014

## 链接

- (http1 2015) [http://www.iso.org/iso/catalogue\\_detail?csnumber=43564](http://www.iso.org/iso/catalogue_detail?csnumber=43564)
- (http2 2015) <http://www.lifecycleinitiative.org/starting-life-cycle-thinking/life-cycle-approaches/>
- (http3 2015) [http://de.wikipedia.org/wiki/ISO/IEC\\_15288](http://de.wikipedia.org/wiki/ISO/IEC_15288)
- (http4 2015) <http://en.wikipedia.org/wiki/IDEF0>
- (http5 2015) <http://sixsigmatutorial.com/what-is-six-sigma-quality-function-deployment-qfd-download-free-excel-qfd-template/50/>
- (http6 2015) <http://www.opak-projekt.de/index.php/projektbeschreibung>
- (http7 2015) <http://www.incose.org/practice/fellowsconsensus.aspx>
- (http8 2015) [http://www.cs.ndsu.nodak.edu/~hdo/pdf\\_files/apsec10.pdf](http://www.cs.ndsu.nodak.edu/~hdo/pdf_files/apsec10.pdf)
- (http9 2015) [www.incose.org](http://www.incose.org)
- (http10 2015) [http://www.chris-kimble.com/Courses/World\\_Med\\_MBA/Software\\_Crisis.html](http://www.chris-kimble.com/Courses/World_Med_MBA/Software_Crisis.html)
- (http11 2015) [http://en.wikipedia.org/wiki/Agile\\_software\\_development](http://en.wikipedia.org/wiki/Agile_software_development)
- (http 12 2015) [http://en.wikibooks.org/wiki/Introduction\\_to\\_Software\\_Engineering/Process/Agile\\_Model](http://en.wikibooks.org/wiki/Introduction_to_Software_Engineering/Process/Agile_Model)
- (http13 2015) <http://www.inf.ed.ac.uk/teaching/courses/cs2/LectureNotes/CS2Ah/SoftEng/se02.pdf>
- (http14 2015) [http://de.wikipedia.org/wiki/Software\\_Requirements\\_Specification](http://de.wikipedia.org/wiki/Software_Requirements_Specification)
- (http15 2015) [http://europa.eu/rapid/press-release\\_MEMO-13-448\\_en.htm](http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-13-448_en.htm)



## 数字制造和工业 4.0

本章首先在 7.1 节简要介绍了制造业，确定工业革命进程中可实现的技术和机会，然后还向读者介绍数字制造，包括智能和敏捷制造以及智能工厂，数字制造/工业 4.0 的主要概念之一。7.2 节介绍了个性化生产的主要概念，这是智能工厂的一个重要应用领域。7.3 节描述了网络化制造和智能供应链的概念，它能够在互联网上发送产品数据以达到服务的目的。7.4 节介绍了并发开放和闭合生产线的范例。7.5 节的主题是网络安全。7.6 节介绍了数个关于数字制造/工业 4.0 的案例研究。7.7 节包含了数字制造/工业 4.0 领域的综合问题，并提出了进一步阅读的参考文献和建议。

### 7.1 制造业简介

正如 3.4.6 节所描述的那样，制造业的主要目标是生产可以卖给客户的商品。因此，为了实现这一目标，需要构建相关设施。现代制造系统包括制造产品所需的所有中间过程和产品部件的集成。应该提到的是，一些行业（例如半导体和钢铁制造商）使用制造（fabrication）代替制造（manufacturing）。

设计合适的生产布局以制造特定的产品，称为流动的生产线。因为机器以这样的方式使产品可以从第一台机器或工作站流向第二台机器，同样从第二台到第三台，一直到走下生产线。原材料进入生产线的前端。产品的加工是在最后的机器或工作站完成的，原材料被转化为相应的生产线的产品。

然而，在工作站的处理可能会经常去除部分原材料。因此，必须提供处理这种材料和任何消耗品的工具。因此，当产品组合和体积合理化时，产品线是有效和高效的制造安排。生产线的设计考虑了机器的定位和维护、零件的成批处理和分配，以及性能如何测量。

性能可以用 Little 法则来衡量。Little 法则（Little 1961）是 1961 年引入的系统动力学的基本定律，是适用于制造系统的最受认可的规则。除了为员工设定一致的目标外，该法则还允许经营者确保他们获得关于制造系统性能的一致数据。在这方面，Little 法则在表现上很简单。它指出，对于一个给定的生产系统区域，下面的等式成立

$$WIP = RP \cdot TT$$

其中  $WIP$  代表正在进行中的工作量， $RP$  是生产速率， $TT$  代表了吞吐量时间。 $WIP$  级别和  $TT$  指的是平均值。在稳态条件下， $WIP$  与  $TT$  成正比；这种情况下的比例常数是生产速率。假设一个制造区有 2 周的  $TT$ ，每周完成 30 个单位的工作量，那么  $WIP$  就是：

$$WIP = RP \cdot TT = 30 \cdot 2 = 60 (\text{单位工作量})$$

这个结果可以解释为，在任何时候，制造系统操作员在生产环境中拥有 2 周的工作时间，或者工作量  $WIP$  等于  $2 \cdot 30$  个单位工作量。因此，这个简单的法则允许为  $WIP$  和  $TT$  设定生产目标，为制造区域的操作员制定一个目标，即每周达到 30 个单位的工作量，并且维持不超过 60 个单位工作量。这个例子可能看起来微不足道，但是对于包含许多产品和许多机器工作中心的更复杂的生产系统来说，设置目标在物理上可能并不明显。在这种情况下，Little 法则的谨慎应用可以成为一个很好的检查点（Suri 1998）。

假设生产率是  $X$ ，在制造系统中有  $N$  个单位工作量。这意味着每个工作站都被一个作业占用。每一个  $1/X$  的时间单位，一个新的工作到达系统，系统中的每一个作业都有一个处理地点。每一次，都会提出一个问题：“要想通过制造系统，需要多长时间？”答案可以通过应用 Little 法则来找到：花费  $1/X$  的时间单位，处理  $N$  个单位工作量，系统中的时间  $T$  为

$$T = N\left(\frac{1}{X}\right)$$

308

表 7.1 制造单元的周期

工作站	周期时间（秒）	工作站	周期时间（秒）
1	8	4	10
2	10	5	8
3	12	6	12

让我们假设一个生产区域可能由 6 个工作站组成。平均工作站循环时间显示在表 7.1 中，工作站之间的运行状况不受限制。

系统中的运行时间（TIS）被定义为每个周期的可用时间除以单位的客户需求。例如，如果可用时间是 8 小时，而客户需求是 2880 个单位，那么 TIS 即

$$TIS = \frac{28\,800 \text{ 秒}}{2\,880 \text{ 单位}} = 10 \text{ 秒}$$

因此，为了满足客户的需求，任何操作都不能超过 10 秒。如果系统的时间超过了，那么必须找到解决方案来改进过程，重新分配操作人员，或者改进方法。将表 7.1 中的工作站周期与 10 秒系统中的工作时间进行比较，可以通过持续改进来减少工作站 3 和 6 的周期时间，可以使用 Kaizen 事件来改进方法或将一些工作内容重新分配到工作站 1 和 5 中，从而允许流程满足客户的需求。

表 7.2 中给出随操作人员数量变化的日生产量。

从表 7.2 可以看出，添加第 6 个操作人员并没有增加生产，而是将 WIP 增加到 1350 个部分。因此，最大的生产量和最低的 WIP 是由 5 个操作人员完成的（Schroer et al. 2007）。

309

在表 7.1 中，因为存在 12 秒的周期时间，增加生产量的一个常见方法是通过工作站 3 和 6 的瓶颈处添加额外的机器，从而增加容量。如果在这两个工作站上都添加了一台机器，总循环时间仍为 60 秒。假设有六个操作员，操作员在一个零件上工作的平均时间是 10 秒或每六个操作员 60 秒。对于工作站 3 和 6 的平均工作周期时间，每个站两台机器的工作站周期时间为 12 秒或单台 6 秒。生产量现在是 28 800 秒/10 秒，或 2880 个单位零件，是两部分的平均 WIP。

由于最大工作站周期时间（现在工作站 2 和 4）仍然是 10 秒，所以添加第 7 和第 8 操作员不会增加生产量。然而，如果使用 7 或 8 位操作员，则平均 WIP 增加到 810 个单位，如表 7.3 所示（Schroer et al. 2007）。

表 7.2 生产量和 WIP 随操作员变化表

每日生产量	WIP	操作员数	每日生产量	WIP	操作员数
480	0	1	1 920	0	4
960	0	2	2 440	0	5
1 400	0	3	2 440	1350	6

表 7.3 生产量和 WIP 在工作站 3 和 6 两台机器随操作员数量变化表

每日生产量	WIP	操作员数
2800	2	6
2800	810	7
2800	810	8

在生产中，装配线与传输线不同，传输线本身就是产品生产布局的例子。产品生产布局具有生产时间（TT）短和在制产品（WIP）库存低的优点。WIP 表示已经向商店发布的正在制造的产品，但该产品尚未完成。因此，产品生产布局有效避免存储、移动、过时、损坏和记录保存的成本。因此，产品生产布局意味着为产品提供所需的制造工艺（Askin and Standridge 1993）。

此外，制造操作包含制造或组装的性质。制造是指为了获得更有用的组件等目的，改变原材料的形态。塑料注射成型、铝挤压、钢配件、钻孔和弯曲龙骨边便是一些制造的例子。装配是指组合单独零件或原材料以产生更有价值的单元或装置。然而，制造系统也可以首先制造零件，然后用这些零件组装成产品。这就要求我们研究物料在制造系统中的流动以及流程如何联系，以期望的质量获得所需的生产量，从而利用并行工程，即同时执行任务。整合设计工程、制造工程等功能，减少将新产品推向市场所需的时间。

嵌入数字技术正在将传统制造转变为先进制造业，其中利用传感器的机器人在工厂车间中变得越来越灵巧、可以移动、并且能够意识到其周围环境。然而，这些机器人需要进一步的发展，以便能够对来自环境的信息进行充分的反馈，或者改变制造行业的情况。如果制造流程中的两个物体不匹配、互相干扰或卡住，则机器人不知道该怎么办。因此，一个重要的目标是让人类和机器人在空间上更紧密地工作，使生产机器人能够从人类工人的现有行为中学习。这将由机器人观察人类工人的活动来完成：识别运动、行动和手势的模式，并处理此信息。因此，机器人通过调整他/她的工作顺序，并将其与自己的生产力相结合来模仿人类工人的灵活性。这些先进的机器人将变得更加自主，具有认知能力，使它们能够在偏远地区工作，然后最终在与人类共同的工作空间中作为“机电同事”一起工作。机器人生成的数据将与来自嵌入在制造环境中的无数小型传感器的信息流相结合。在这种背景下，数字世界的元素（硬件、软件、网络和数据）在制造业中变得无处不在，而且它们正在迅速地、广泛地、深入地进行，正如参考文献（Westerman et al. 2014）所报道的那样。

[310]

自工业革命以来（通常称为工业演变），制造业已经为国家和公司变革的基础，如图 7.1 所示。在 18 世纪，第一次工业革命即工业 1.0 的特点是机械生产由水和蒸汽驱动。20 世纪的工业革命即工业 2.0 基于分工和电力供电，大大改进了生产效率。20 世纪 70 年代，工业 3.0 由嵌入式电子和信息技术（IT）启动，用于进一步的生产自动化。今天，我们可以根据将通信、IT、数据和物理组件相结合的信息物理系统（CPPS）引入数字制造/工业 4.0，将传统制造系统转变为智能制造系统，详见 7.1.1 节。要实现这一目标，要解决机械工程、电气工程、信息通信技术和云计算等异构环境问题的标准。

7.1.1 智能和敏捷制造

智能制造是制造的未来，通过信息物理系统（CPS）（见第 3 章）融合虚拟和物理世界，使嵌入技术和业务流程融合。这种新的工业制造方法称为数字制造/工业 4.0 或智能工厂。

与传统制造系统相比，智能制造提供了重要的实时质量、时间、资源和成本优势。因此，

智能制造是根据可持续的、面向服务的商业惯例而设计的。这种方法具有适应性、灵活性、自适应性和学习特性，支持容错和风险管理，这是通过基于 CPS 的制造单位的灵活网络实现的。这些单位能够自动监督整个制造过程以及智能制造系统中的产品状态。这有助于创建能够几乎实时响应的灵活制造系统，并且可以根据拥有自适应能力和自我管理的制造单元的 global 网络进行优化。

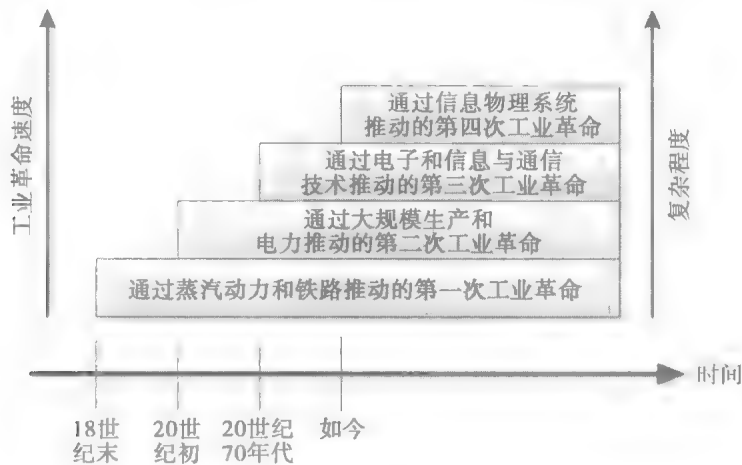


图 7.1 工业革命的四个阶段

因此，在智能制造中，机器能够与产品和其他制造机器信息交互，以提供决策关键数据。这使得所有信息能够被实时处理和分发，从而通过数字制造/工业 4.0 规范整合到整个制造系统。

智能制造代表了制造业革命，是创新、成本和省时方面的第四次工业革命。这种自下而上的制造模式与传统的制造系统相比，拥有更大的市场或客户驱动，具有许多优势。包括以下内容（http1 2015）。

- CPS 优化的制造过程：智能制造单元能够确定和识别其活动领域、配置选项和制造条件，以及与其他单元进行独立和无线的通信；
- 优化的个人客户产品制造：这是通过对理想的生产单元的智能编译完成的，这些制造单元考虑了产品特性、成本、物流、安全性、可靠性、时间和可持续性；
- 资源有效的生产：针对人力劳动力进行量身定制的调整，使制造机器能够适应人的工作周期。

2012 年，世界经济论坛（WEF）出版的题为“制造业的未来：促进经济增长的机会”（The Future of Manufacturing: Opportunities to Drive Economic Growth）的研究报告（Lopez Research 2014）指出：

…制造业对国家的繁荣非常重要，在 128 个国家的收入变化中，有超过 70% 是由制造业产品出口数据的差异所解释的。

《Economist》在 2012 年宣称，今天可以看到一场新的工业革命，它的基础是制造业的数字化。另一些人则将此称为智能制造。

制造业一般对国内生产总值（GDP）产生巨大影响，预计将从现在的水平稳步上升。在此背景下，国内生产总值数据用于衡量整个国家或地区的经济表现，但也可以衡量工业部门的相对贡献。据估计，通过将 CPS 的关键技术（见第 3 章）和物联网（见第 4 章）嵌入到制造过程中，制造业将会随着 GDP 的增长而增长。然而，竞争激烈的全球市场，例如制造业的成功，

311  
312

不仅取决于持续的产品创新和服务，而且还取决于智能制造流程，最终还取决于智能工厂（见 7.1.2 节）。

随着制造业向高附加值业务转移，其主要贡献是生产率增长：例如，欧洲企业研发的 65% 用于制造业向高附加值业务转移，其生产率增长的 60% 来源于高附加值制造业。洛佩斯研究（Lopez Research 2014）报道，这种向高附加值活动的转变，与制造业日益增长的服务相关联，这是一种通过增加产品服务来创造价值和提高创新能力的策略，制造业向高附加值产品的转型将会带来更多创新和更高技能的活动。高附加值活动的发展正越来越多地通过全球价值链进行。参与全球价值链可以使公司（和国家）专注于某些活动，并且更有效率地提高生产率增长。在欧洲，许多公司也参与欧洲的价值链。这些欧洲价值链是全球欧洲制造链的组成部分，使得欧洲制造业公司具有全球竞争力（Veugeliers and Sapir 2013）。

与智能制造相比，敏捷制造是在当今快速发展的市场中发展竞争优势的一种方法，其中大众市场分散到缝隙市场。这要求将组织、工人和技术结合成一体化协调的整体。因此，敏捷制造业非常注重快速响应客户需求，将速度和灵活性转化为关键的竞争优势。敏捷制造公司可以利用短暂的机会和客户需求的快速变化，从而处于更好的位置。

随着敏捷制造的概念，在制造业世界中引入了一种新的规范，其敏捷性的特征在于：

- 可能导致虚拟公司的合作和协同作用；
- 战略愿景，使组织能够面对持续和不可预测的变化而蓬勃发展；
- 创造和交付有客户价值的、高质量的、大众化的产品和/或服务；
- 由有知识和有能力的劳动力组成的灵活的组织结构，并由高端信息和通信技术基础设施提供便利，这些基础设施将组织合作伙伴连接在一个统一的电子网络中（Sanchez and Nagi 2001）。

因此，制造业的敏捷性可以看作制造商采取的策略，以提升自身的性能，从而使其能够在竞争日益激烈的客户需求和日益激烈的市场中成为国家和国际领导者。敏捷规范的基础是在制造过程中达成协同竞争优势的必要条件。敏捷规范是一种组织形式，具有流程、工具和培训，使制造商能够在控制成本和质量的同时，快速地响应客户需求和市场变化。

敏捷制造的概念侧重于快速响应客户需求，将速度和敏捷性转化为关键的竞争优势。这一概念在 Iacocca 研究所的一份报告中被称为“21 世纪制造企业战略”（Iacocca 1991）。成为敏捷制造商的一个有利因素是制造支持技术的发展，允许市场营销、设计和生产人员分享：

- 零件和产品的通用数据库；
- 关于生产能力和问题的数据，最初认为是可忽略的问题，但可能会产生较大的下游效应。

此外，在拥有巨大、发达的本地市场和高昂的劳动力成本的国家，敏捷制造对于制造商来说具有特别的价值。它通过提供前所未有的速度和个性化的产品来接近市场，这是离岸竞争对手敌不过的，并将把本地制造变成一个竞争优势。

敏捷制造有四个关键要素，如图 7.2 所示（http2 2015）

- 模块化产品设计：以一种模块化的方式设计产品，使它们能够作为快速和简单变化的平台；
- 信息技术：自动化公司数字化信息的快速传播，实现对订单的快速响应；

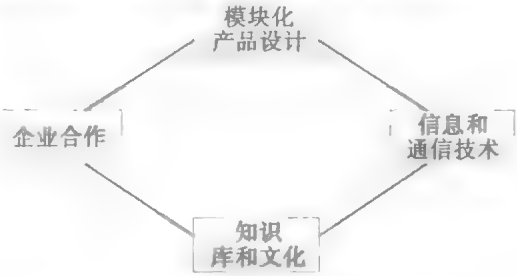


图 7.2 敏捷制造的四个关键要素

- 企业合作伙伴：与其他制造商建立虚拟短期联盟，从而改善所选产品细分市场的上市时间；
- 知识文化：投资员工培训以实现支持快速变化和持续适应的文化。

从图 7.2 可以看出，敏捷制造的核心是部署先进的信息和通信技术，发展有弹性的组织结构，以支持高技能、知识渊博和有能力的员工。因此，敏捷制造企业有望能够快速响应客户需求的变化。通过敏捷制造，客户不仅可以获得产品和服务，还能够轻松评估和利用能力，从而使他们能够利用这些能力来实现他们正在寻找的内容（Kidd 1994）

正如在参考文献（http2 2015）中所描述的，对于任何给定的业务部门，敏捷制造的使用应该从以下问题的答案开始：

- 该公司目前产品之一的个性化快速交付版本是否有潜在市场？
- 在公司的能力范围内（或者可以与合作伙伴共同开发），是否有一种新产品能够在公司的个性化和快速交付中得到强烈的资助？

在参考文献（http2 2015）中，一个例子是“3 天汽车项目（在英国）和 5 天汽车项目（在欧盟），它的重点是将汽车制造转变成一个构建 - 订单系统（即，每一辆车都是为一个特别的客户订单而建的），交付时间是用天数而不是几周或几个月来测量的。考虑到汽车的实际生产时间是 1.5 天，这是一个现实的目标，尽管可能还不是一个可以实现的目标。但毫无疑问，这些公司将创造出一种具有象征意义的竞争优势。”

315

7.1.2 智能工厂

数字制造/工业 4.0 的核心要素是智能制造或智能制造系统，即所谓的智能工厂。一般来说，数字制造/工业 4.0 可以作为一系列工业创新来介绍，从基于机械化的第一和第二次工业革命开始，到以精细生产为重点的自动化的三次工业革命，以及嵌入 CPS、智能机器、智能产品和移动设备等虚拟化技术的第四次工业革命，从而形成了智能化的工厂模式。

智能工厂模式将允许个人制造、弹性制造和增广操作。这意味着一个智能的工厂将会通过所有利益相关者和参与制造过程的资源的新的社会技术交互作用来区分自身。一个智能工厂将集中在自主的、位置控制的、知识的、基于传感器的、空间分布的制造资源的相互连接上，例如制造机器、机器人、传送带和存储系统，以及包括它们的计划和控制系统的实用工具。因此，一个智能工厂将以一致的工程方法为特征，将制造过程和制造产品本身结合在一起，在这个过程中，信息和物理世界是无缝的。因此，在智能工厂的环境下，数字制造/工业 4.0 可以解释为在制造产品、系统和机器之间的点对点信息和通信。

数字制造/工业 4.0 背后的基本原则是信息物理系统（见第 3 章）和物联网（IoT）（见第 4 章）的出现。这些创新使智能制造得以实现，或者从更广义的意义上讲，是智能工厂的理念。在工厂里，机器对机器（M2M）的通信使制造商能够沿着整个价值链建立一个智能的网络。制造单元可以相互独立地进行交流、感知和实现，并能明显减少人类操作员的干预。

因此，智能工厂的愿景是，这种模式将允许制造产品通过它们的产品代码共享生产机器的需求，确定哪些需求是必要的，然后决定下一步需要什么生产步骤，从而控制它们自己的生产。智能工厂的一种角度是：CPS 是一种能够将虚拟现实世界与物联网结合在一起的技术。物联网可以看作基础设施，用以收集信息，并在物理空间中控制自己和其他事物。在这方面，信息物理制造系统（CPMS）通过在计算机硬件上集成中间件和网络软件，在虚拟和物理世界的对象之间产生协同作用。

316

此外，智能制造将在很大程度上控制和优化自身，因为制造的产品彼此通信，并与制造车

间的机器进行通信,以适应或阐明其生产步骤的顺序。此外,一个智能工厂还将根据需要安排制造优先事项,以及生产线中产品的紧急要求。为实现这一目标,自主执行计算机程序的软件代理商将能够监控必要的流程,并确保生产规则得到遵守或按需进行调整。因此,工厂将能够经济地制造个体产品。这将导致制造机器监控自身的挑战;并且在预测失败的情况下,它们将自主激活相应的维护程序以消除故障。

在洛佩兹研究机构 (Lopez Research 2014) 的预测研究记录中,有这样的描述: Bosch、General Electric 和 Johnson Controls 等公司提供了一种物联网,在这种情况下,机器可以自动预测故障,并自动触发维护过程,而不是依靠维修人员或许不可靠的监控。另一个物联网 (IoT) 示例展示了一种自组织的逻辑方法,它对生产过程中的意外变化做出反应,例如材料短缺、瓶颈等。因此,制造商将使用智能 IT 来实现实时、动态、有效、自动化的生产流程。

智能信息技术驱动的流程和物联网将会带来新的附加值,正如参考文献 (Christensen 2015) 和 (Lopez 2014) 所描述的那样。

- 管理人员/操作人员: 通过智能网络连接的传感器,将为制造操作和供应链提供前所未有的可见性,这使得智能工厂的制造线更加深入,而不仅仅是目前的高价值流程。因此,在智能工厂中使用物联网模式将会改善制造业,将运营商与需求的信息连接起来,使用合适的设备在需求点和跨企业边界,包括供应商数据、维护合作伙伴数据、分销链数据等等。

因此,在数字制造/工业 4.0 中,工厂管理者/操作员将能够访问智能工厂云,目的是将来自生产线的组件供应商的信息集中起来,从而优化供应链。这将通过在智能设备上运行的软件应用实现。这样的智能设备还将允许工厂经理/操作员访问生产设备和生产线的基本数据,并以比现在定制系统更低的成本,从生产线上的任何位置实现数据或警报的可视化。

此外,在一个智能工厂中,管理者/操作人员将能够根据情景和环境敏感的目标进行控制、调节和塑造智能交叉连接的生产资源和制造步骤。因此,他们将在智能工厂中扮演质量保证的重要角色。今后,智能工厂中日益增加的过程复杂性将变得可控,从而提高生产率、质量水平、产品的可用性和弹性,以获得最佳的资源。

- 机器对机器/流程通信: 将物联网引入智能工厂,将使它们能够加强通信,从而使信息更快、决策更快,并通过将设备连接到操作和业务软件流程,从而提高市场响应能力。

机器对机器的通信尤其会使自动化程度更高。在参考文献 (Christensen 2015) 和 (Lopez 2014) 中提到的一个例子是关于通用汽车公司,它使用传感器数据来决定是否太潮湿而不能喷漆汽车。如果系统识别出不利的条件,汽车就会在制造过程中被重新安排到另一个区域,减少重新喷漆和最大化工厂的正常运行时间。这种变化为公司节省了很多钱。

还可以想象,公司的内部云可以与世界各地的制造地点联合,分配机器操作数据。这将允许识别和更好地协调所需的修理工作,从而更有效地利用资源。最终,个别地点将控制自己的工作。到目前为止,在云中,已经存储了合适的基于软件的算法 (应用程序)。

- 智能数据: 物联网将改变嵌入在智能工厂系统中的设备类型,即一些物理连接设备,例如传感器、执行器、射频识别 (RFID) 标签和读写器,以及其他连接到互联网和互连的设备。

智能数据包括处理和分析,而不仅仅是大数据,大数据是指数据规模大、动态或

复杂的数据，它们不能由传统的数据处理应用程序处理，并且具有容量、速度和多样性这三种特征。这三个指标指的是数据量的稳步增长、数据传输的速度高，以及数据以适当方式存储、分析和显示结果的格式。这些数据分析需要来自于具有物联网的设备和服务的数据，这将是预测、主动维护、智能自动化和整体数字化等领域的基础，也就是通过数据来创新的制造业。因此，智能数据指的是基于智能或智能分析大量数据的新应用程序的开发。这些应用程序将把智能数据转化为智能工厂生产线的可执行数据。因此，智能数据不仅要回答这样的问题：“现在在生产线上发生了什么？”同时还有“生产线上很快会发生什么；要有效地运行产品组合成本需要什么？”

[318]

总的来说，人们认为物联网将会影响到每一个企业，并有能力从根本上改变工业业务，例如生产制造、企业营销等，因为互联网是一个以指数速度扩张的行业。在智能工厂中，将会有越来越多的机器和设备在生产流水线上传输大量的数据。因此，一家智能工厂的生产将嵌入智能分析能力，从而在更有效的工厂操作上做出更明智的决策。未来的智能工厂将会连接不同的领域，例如：

- 材料需求计划；
- 制造资源规划；
- 制造执行系统。

这些领域将使智能工厂从生产过程中获得最优的结果，这是在工业和设备研究之间进行的共同的、创新的研究工作的一部分。由于目前还没有成熟的智能工厂来衡量使用标准和实现的成功，研究机构正在调查与它的开发和实施相关的概念，以提供测量和控制的机制。最先进的概念之一是KL智慧工厂（SmartFactory<sup>KL</sup>）。基于一项可行性研究，2005年6月成立了一个名为“KL智慧工厂技术创新”（Technology Initiative SmartFactory<sup>KL</sup>）的非盈利协会。创始合伙人代表了经济和研究方面的各个领域。它们的共同目标是开发、应用和分配创新的工业技术，并为它们在研究和实践中的广泛应用打下基础。该伙伴关系已发展到21个参与者，包括工厂设备的生产商和用户以及大学和研究中心。

作为“KL智慧工厂技术创新”项目的成果，一个混合的生产设备已经成为示范和开发平台。它生产彩色的液体肥皂。该产品是按需制造和分配的，按客户的要求进行加工、标记和交付。工厂的设计是严格模块化的，它由一个生产过程区域和一个部件处理区域组成。这些机械和部件与现代工业工厂中使用的来自不同制造商的部件是一样的。其结果是一个可供研究的多供应商的生产和处理设施，其复杂性与真正的制造工厂相比简直是不相上下。图7.3显示了KL智慧工厂的机械设施，图7.4显示了KL智慧工厂的建筑平面图（Zühlke 2008）。

KL智慧工厂的研究工作重点是在自动化系统中使用创新的信息和通信技术，以及由此产生的对这些系统设计的挑战。在演示设备中使用了不同的无线通信系统。因此，已实现一个永久性的无线局域网（WLAN）连接，用于将设备的控制系统组件分散到更高级别的控制中心。蓝牙、物联网、超宽带（UWB）、近场通信（NFC）、RFID系统（见第4章）都被部署在组件中，这些组件作为传感器/驱动器级别的扩展链接到系统中。无线通信保证了工厂布局的新型自由性，并减少了规划工作，因为不再需要连接线。然而，在这种不均匀的环境中，无线电通信的健壮性必须得到证明。在这个演示设备中，安装了几个监控设备来监控数据传输中的频带和服务质量。使用各种干扰源来检查系统的电磁兼容性。

[319]

无线通信与模块化结构结合，使得设备可以根据“即插即用”原理进行操作。每个任务都在流程链中充当一个良好明确的函数。因为除了电源之外，其他组件之间没有物理连接，所以替换或添加单个组件来修改或扩展生产流程是相对简单的。组件识别它们的功能，将自己定



位在流程链中，并自动集成到控制系统中进行生产管理。信息的配置变得更加简单，因为组件从制造环境中识别出它们的任务，并将它们自己调到周围的制造组件中



图 7.3 KL 智慧工厂的机械设施 (Zuhlke 2008)



图 7.4 KL 智慧工厂的建筑平面图 (Zuhlke 2008)

“plug’n work” 原理的逻辑延续是来自于传统的面向服务的控制体系结构 (SOA) 的转变。使用开放的 SOA 允许任何人访问开放的、面向服务的体系结构平台，并与其构建块进行交互。因此，SOA 支持通过组合松散耦合的服务来构建应用程序，这些服务基于一种独立于底层平台

和编程语言的正式的服务来进行互操作。因此，SOA 使得通过网络连接的计算机很容易进行协作。每台计算机都可以运行任意数量的服务，并且每个服务都以一种方式构建，以确保它可以在没有人工交互的情况下与网络中的任何其他服务交换信息，并且不需要对底层程序本身进行更改（Möller 2014）。

KL 智慧工厂已经通过实验将工厂控制的一个子区域转换为 SOA 架构。这样做的目的是为了获得在处理工业控制过程的新体系结构方面的经验。目前的系统基于一个根据 ISA-95 标准的业务到生产标记语言（B2MML）模型、一个 Web 服务描述语言（WSDL）模型以及用于系统管理的业务流程执行语言（BPEL）。虽然这个测试案例揭示了 SOA 体系结构的基本优势，但它也清楚地显示了这种模式变化对公司总体信息结构的影响（Zühlke 2008）。

利用无线电技术，还可以使用新的移动设备、操作系统来进行生产、维护和诊断相关设施。如今，大多数传感器和执行器以及更复杂的机电设备都配备了固定的控制面板，从只有几个按钮和灯光到完全基于 PC 的液晶显示器（LCD）面板。由于缺乏标准且功能不断增加，这些设备操作系统的复杂性正在迅速增加，这不仅导致了更高的成本，而且还导致了培训和维护方面的问题。解决这个问题一个办法是设备和控制面板的物理分离。无线电技术使标准的控制设备（例如个人数字助理（PDA）或移动电话）能够访问不同的供应商的设备。一个标准的、被广泛接受的、一致的控制概念提高了学习此类系统的能力，并防止了操作错误。位置独立性和先进的显示和交互的可能性，使设备操作的灵活性得到了明显的提高。

位置感知系统与生产和物流过程的整合是满足更高灵活性和更短生产周期需求的主要条件。有效利用位置数据可以实现灵活的上下文相关应用程序和基于位置的服务。各种定位系统部署在 KL 智慧工厂演示设备上。例如，使用 RFID 标签网格（见 4.1 节），这些标签可以由移动单元读取以确定位置数据。其他的基于超声波和射频技术的三维定位系统也已安装，目前正在进行测试，特别是在工业条件下可实现的精度方面。安装的系统覆盖了自动化金字塔内的所有组件，如图 7.5 所示，从设备（传感器/执行器）和可编程逻辑控制器（PLC）到过程管理和制造执行系统（MES）到企业资源规划（ERP）软件。KL 智慧工厂表示了工业制造的全部控制技术。

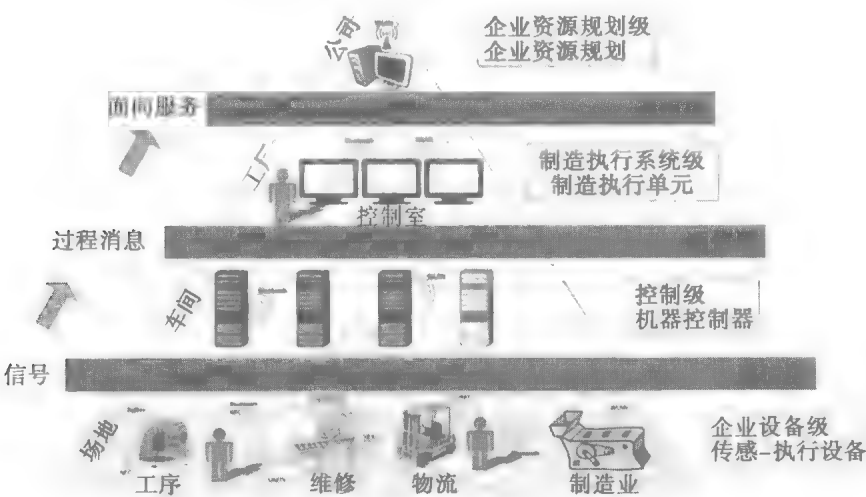


图 7.5 自动化金字塔（Zühlke 2008）

KL 智慧工厂提供的平台是众多项目中众多合作伙伴研究和开发的基础。例如，已经开发

320  
321

出了一种演示程序，显示了商业手机在组件无线电参数化方面的可用性（Görlich et al. 2007）。通过使用几个不同品牌的手机运行的 Java 软件，可以在 KL 智慧工厂上监视和使用大量的设备。可用的设备和无线连接是自动识别的。此外，统一的操作原理有助于处理现场设备，并能够从车间的任何位置访问任何设备，从而加速现场设备的参数化、诊断和控制。在不改变位置的情况下，可以从一个设备快速切换到另一个设备（Zühlke 2008）。

一旦机器和系统连接到智能工厂，它们的信息将用于自动化工作，以维护和/或在没有人为干预的情况下优化生产线。越来越多的智能工厂的人工任务将通过大量数据来监控制造过程，其中经理/经营者必须创造有意义的东西。因此，智能工厂的特点是它与智能手机或平板电脑等移动智能设备的交互作用，生产经理/操作人员可以在智能工厂生产线的特定传感器上使用这些智能设备。例如，多少部件被处理，何时哪个废品率达到一定的水平，等等。因此，移动管理器/操作员面板和无线技术是制造自动化未来发展的关键因素之一，例如智能工厂（Terwisch and Ganz 2009）。

提及现如今的移动和交互系统在消费领域的成功，智能移动交互系统的使用是工业人机交互的一种很有前途的方法。从经济的角度来看，智能移动设备和软件平台的开发正是由于低销量和高开发成本的原因。智能手机和平板电脑等现有硬件的适应和整合，以及 Android、iOS 和 Windows 等软件技术，已经证明，它们有望在促进新型工业交互技术方面发挥作用。

从此以后，在智能工厂里，再也不会有一台中央计算机了。制造机器和部件将自行控制。生产人员将用智能移动设备来监督整个生产过程，而不是集中在控制面板。因此，智能工厂设施将是灵活的，这样每一份工作都可以与以前和以后的工作有所不同，但与大规模生产中成本一样低。在不久的将来，智能制造将成为日常制造的现实。为了这个目的，将所有的机器连接在一起，并配备了必要的自适应部件，装备有传感器进行标记和跟踪。这也意味着未来智能工厂中的机器将能够在过热之前进行先进的维护，而存储系统将能够自行组织起来。由于互联网的可用性，智能工厂正在成为可能，在智能数据和信息物理系统（CPS）的背景下，它拥有巨大的存储和数据处理能力。

7.1.3 工业 4.0

在过去，高价值的制造设备在封闭的、硬连接的网络环境中大量地使用。工业传感器、控制器和网络都很昂贵，在现有设施中升级项目并不容易。此外，在消费者方面使用物联网（见第 4 章）的增长，已经推动了传感器、控制器和通信等高端半导体制造领域的成本削减，例如智能设备。然而，标准的工业设备受到庞大的遗留设备和标准的限制。获取、运输和消费资本、能源、人力资源、信息和原材料，从而将这些材料转化为增值产品和零部件。为了实现这一目标，正在全球范围内努力实现工业生产的下一阶段创新。在德国，正开展对工业 4.0 标题的推广，在其他欧洲国家、美国、中国和许多其他国家，已经建立了类似的计划，为将来定制的智能工业铺平道路。

在工业 4.0、数字制造、或智能工厂的标签下，制造业的优势在于可以定制产品的网络化、灵活性和动态性，组织良好的生产线。来自制造业消费市场的基于现代信息和通信技术的通用人机交互界面，作为移动操作员面板和无线技术以及未来制造业自动化发展的关键因素之一，将会伴随着从固定式到移动式的趋势（Terwiesch and Ganz 2009）。

除了基于物联网的新业务流程和制造方法外，数据和服务是数字制造/工业 4.0 应用研究和开发的新领域。因此，工业制造的进步最终取决于各种创新的发展阶段。正如 7.1 节所介绍的，现代工业社会的历史与一种创新的发展联系在一起，它通常当作工业革命来传播。这些革

命背后的驱动力并不是富有魅力的政治领袖，而是制造公司的工程师、科学家、管理者和雇员，他们负责技术创新，在 19 世纪后半期称为“革命”。主要的创新者代表是化学、光学行业和汽车行业等领域。

2011 年 4 月，在德国的汉诺威博览会（Hannover Fair），世界上最大的工业博览会上，“工业 4.0”这个词被公之于众。工业 4.0 的目标是创建智能工厂，以其转换能力、资源效率、人机工程学为特征，并将客户和业务伙伴集成到业务和增值过程中。支持技术是 CPS（见第 3 章），它将虚拟和物理世界结合在一起，构建一个智能对象相互通信和交互的网络互联世界。

正如第 3 章所介绍的，CPS 代表了当前嵌入式计算机系统的下一个进化阶段，并为物联网的创建提供了基础，后来扩展到了物联网数据分析系统，这是工业 4.0 的基本构建模块。工业 4.0 的方法是建立在小型的计算机网络上，这些计算机配有传感器和执行器，这些传感器和执行器被嵌入到材料、物体、设备和机器部件中，并通过互联网连接到一起（详见第 2 章和第 5 章）。随着工业 4.0 的发展，传统的工业用设备将被 CPS 取代，成为物联网中的智能代理，并代表智能工厂的基本框架。此外，在工业 4.0 的方法中，工厂、机器和个人的工作部件通过因特网不断地交换信息。所有的生产过程和物流过程都被嵌入到这个通信网络中。

未来将会有大量的工业应用，其中包含了这些关键技术，使得许多加工流程能够在很长一段时间内实时协调和控制。然而，这需要许多独立的制造过程步骤和可操作模型的编程模块的标准化和模块化。这代表了一场制造业革命，包括创新、成本和时间，以及创造一种自下而上的制造价值创造模式，其网络能力创造了新的和更多的市场机会。然而，制造业的优势并不仅仅局限于一次性的制造条件，还可以根据一个由多个操作组成的自适应和自组织制造单元的全球网络进行优化。

在这方面，物联网为数据的连续交换创造条件，在这种情况下，自动进行过程调整。此外，CPS 的使用允许通过嵌入式计算系统处理环境数据，并推导控制命令，使产品本身能够完成制作流程的分散化。这样，制造业就变得更加灵活。灵活性也是通过开放式的机器设计实现的，它可以按时间顺序运行不同的功能或工具。通过使用数字产品记忆（DPM）和直接存储订单相关数据，制造的工作通过根据客户的需求选择制造过程，来管理自己的制造过程。这种制作结果是一个定制的产品。

[325]

DPM 的概念提供了一种更全面、更有意义的方法，使用数字生命周期信息来标记物理对象。因此，将 DPM 应用于物理对象主要依赖于它的概念设计和实现，特别是可以识别特定领域的需求时更是如此。作为提供增值服务的工作解决方案，DPM 不仅在生产过程中，而且在其生命周期的后期有助于生产（Stephan et al. 2013）。

除了 DPM 之外，工业 4.0 还将支持全面的语义制造概念，并在整个价值链中动态调整和集成生产过程。也将合并自我调整的加工网络和嵌入式控制系统，创建出一个基于故障诊断能力的模型。这将保证该公司关于设备、产品、流程、服务以及更多知识的信息能够实时地从任何地点获得。

今后，在工业 4.0 时代，少量的产品将在大规模生产条件下生产，而制造过程本身将控制产品的组装。不同于传统的工业 1.0 至工业 3.0，工业 4.0 时代在很大程度上是互联网与制造技术的融合。因此，可以认为工业 4.0 是一个开放的系统，它不像以前的概念那样依赖于单一的技术。相反，可以认为它是一个工具箱，拥有几乎无限的自动可用的各种工具。因此，工业 4.0 代表了一种新的模式，在生产车间上进行了智能的进化，现在一切都可以通过数字化进行编程。因此，具有嵌入式传感器和通信能力的智能产品是活跃的信息载体，可以在整个产品生命周期中无缝地收集和使用信息。它们是可寻址和可识别的（详见 6.1.1 节）。

第四次工业革命（工业 4.0）由数字化推动，有三个进化过程，通过它们，赋予工业产品更广泛的特性或特性，正如 7.1 节所介绍的。

- 第一次工业革命：在 18 世纪引入蒸汽机和手工劳动的机械化；
- 第二次工业革命：在 20 世纪初，通过大规模生产使其成为可能，使汽车等产品的制造技术得以提高（例如，汽车反光镜是可电动调节和加热的）；
- 第三次工业革命：近几十年来，通过电子和计算机技术对制造业和制造业自动化的应用，增加了产品技术特征的可能性（例如，汽车可以记住驾驶员座椅和后视镜的各种设置，并通过打个响指来恢复它们）；
- 第四次工业革命：利用整个价值链的数字化，并以虚拟模型的形式持续获取信息。数据和知识在任何时候任何地点都会发生变化，许多行业的规则都会通过计算机化或在制造车间进行智能改革，从而增加更复杂的技术特征的可能性。通过使用汽车的例子，可以假定以下结果：
- 导航系统基于当前的交通网络数据进行导航；
- 个人汽车设置不再存储在汽车中，而是在用户的私有云域内，并与用户一起从汽车到汽车传递。看看客户忠诚度会发生什么变化，尤其是在租车业务方面，这将是一件很有趣的事情；
- 洗碗机和/或洗衣机可能在使用者的私人云域中写入购物清单，并将其广播到用户的汽车信息娱乐或云系统，留下用户开车到杂货店的消息，在开车回家前购买所需的洗涤剂；
- 车到车之间的交流对话（例如，一辆汽车正准备穿越事故现场，及时发出警告、并提供可能的替代路线。）；
- 当司机预计将到家时，汽车会通知智能家庭自动化系统，并在适当的时候打开加热/冷却系统；
- 错误信息将直接从汽车发送到经销商的服务车间，以确保所有需要的零部件都可以使用，并将预约经销商车间进行维修。

在工业 4.0 时代的制造业中，技术将会及时被开发出来，允许以最好的质量生产少数产品，且保证了低成本生产。制造商将能够为波动的市场和全球趋势提供大量的各种版本或小系列产品，并满足客户个性化的需求。工业 4.0 时代的 KL 智慧工厂项目解决了这一挑战，在所有级别的制造中，使用自适应的 CPS 来实现集成制造系统的引入、实现和操作，如图 7.6 所示。因此，一个专用功能部件是智能产品的智能数据分析，以及智能产品的使用和服务，从而得出智能数据，从而可以提取出新的或改进的产品和服务。信息物理系统和物联网将成为为未来智能工厂带来灵活性、弹性和多重适应性的重要特征。

因此，进入工业 4.0 时代的道路将会是一个创新的和进化的过程，就像之前引起工业剧变的制造技术一样。在 20 世纪 70 年代早期，自动化就进入了制造业。客户要求更多高质量的产品。这使得在制造业中使用电子和信息技术成为可能。手工制造的步骤被机器取代，这是第三次工业革命的开端。今天，我们正处于第四次工业革命的风口浪尖，也称为数字制造/工业 4.0。智能的、网络化的系统预计将引领这一变革，这一变革的

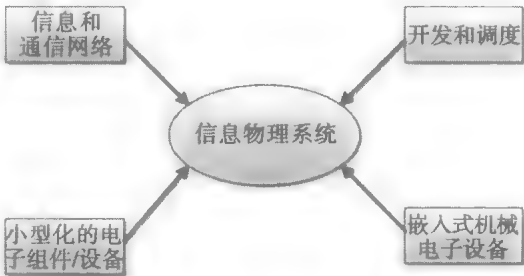


图 7.6 智能技术系统的发展

[326]

[327]

基础是电子、软件技术、网络和机电一体化等领域的发展，从而形成了 CPS 模式

## 7.2 个性化生产

“大规模定制化生产”这个词是在 20 世纪 80 年代末被提出的，它已经成为有关运营管理的研究课题（Pine 1993）。因此，在例如全球化和互联网的不断发展等制造业和其他主要行业发展趋势中，大规模的“定制化”的概念对商业战略和在 21 世纪的运营制造公司有着巨大的影响

Tseng 和 Jiao（2001）将大规模定制化制造业定义为“生产商品和服务，以满足个体客户的需求，并具有较高的生产效率”。在 Kaplan 和 Haenlein（2006）的介绍中，将制造业的大规模定制化描述为：“通过某种形式的公司 - 客户互动，在运营层面的制造和组装阶段创造价值，以创建具有与批量生产产品相似的生产成本和货币价格的定制产品”。在 McCarthy（2004）的介绍中，将大规模定制化制造业定义为“制造企业为相对较大的市场生产相对较大数量的产品选项的能力，这就要求定制产品在成本、交付和质量方面没有折扣”。大规模定制化对制造业供应链的影响涉及信息和材料流以及产品类型和解耦点之间的联系等，这方面已经被广泛研究，如文献（Yang and Burns 2003）。因此，大规模定制化生产策略也会对客户满意度产生影响，例如延期交付。

与之相反，个性化制造描述了一个制造过程，在这个过程中，制造系统的所有要素都以这样一种方式设计——在大规模生产成本下达到高水平的产品多样化。如今，制造业企业面临着巨大的挑战，这是由于对个性化制造的需求不断增加。机器和系统（例如机床）必须能够以个性化的方式实现生产过程，并有效地利用资源。与此同时，它们需要确保产品的质量和操作的方便性。

到目前为止，机器工具大多需要手工调整，以适应个性化产品的制造过程。此外，在生产过程中不能识别和纠正错误（如产品质量的波动），导致机器停机和生产浪费。因此，新技术的发展（例如智能嵌入式先进的测量系统）提供了提高个体制造的机床自动化水平的机会。

个性化制造的目标是开发智能机床，能够自主调整单独加工流程的机器的安装过程，并检查已完成工作模块的质量，这需要确定各个加工过程的自动化需求。这一步骤可以在 CPS 上实现，它允许对未来进行分析，而不减少工件的加工和工作空间，并自动调整机器资源的每一个加工过程。通过自动地将其与计算机辅助设计（CAD）系统的目标数据进行比较，可以检查出该产品的质量。这个过程可以使用一个演示系统进行测试，然后集成到相应的机器工具中。这将使机床在未来更加灵活，而不会降低加工过程的可靠性或产品的质量。信息物理系统（CPS）为制造业的设计和 value 创造过程提供了创新的解决方案，从而为应对这些挑战提供了可能。

这些是未来的技术手段，将塑造所有主流的制造系统。因此，在个性化的工业制造中，CPS 有可能在生产线内所有管理和控制水平的精确整合的基础上，引起巨大的效率和生产力的提高，这对于全球市场的竞争力至关重要。今天，相关的数据会自动从上到下的流动。相反，来自制造业的数据用于监控制造过程，并在必要时进行更改。根据这种制造变更的程度，必须涉及各种决策层面。复杂的软件解决方案协调整个流程，并将其与用户友好的界面进行集成。所有制造相关的过程的协调工作都在多个制造场所之间进行，因为互联网接入机器，制造设备的其他制造资源是相互关联的，这样就可以很容易地实现个性化的制造过程。嵌入式智能传感器不仅可以观察进程和环境，还可以对数据进行处理，并将返回的结果传输回系统循环中。这就允许对复杂的制造系统进行监控和控制，以适应其特殊的制造需求，也可以在个性化的制造过程中充当早期预警系统。

### 7.3 网络制造一体化工业

技术变革,尤其是数字化,极大地改变了全球制造过程的架构。通过促进大量信息的管理和传播,数字化已经允许了高度精密的制造过程的制定。一旦编制完成,流程就可以划分为离散步骤——模块,在效果和标准上,以确保能够建立它们之间的连接。

相反地,模块化允许那些曾经需要在一个公司内部且同一地域范围和同一组织管理的活动,在地域上进行分散和组织上扩展。问题不是任何活动都可以在任何地方进行,或者所有的制造都是完全模块化的,而是为现在组织活动提供一个新选择(Steinfeld 2004)。

因此,为了实现有效的价值链,在技术和组织层面的网络是网络制造的一个关键因素,以实现有效的价值链。制造业的这一变化以网络制造一体化工业为特征,最终形成了自我管理的制造特征。生产过程中涉及的机器和设备、存储和/或部件、传感器和网络都相互通信。所使用的软件为工件提供了必要的智能,使机器能够了解如何处理它们,以及它们在生产过程中的实际装配状态。这将使未来在大规模生产的成本水平上实现独一无二的制造,并将通过嵌入CPS来实现。CPS是网络制造一体化工业的关键技术。过程、产品、设备和工人将通过互联网进行组合和交流。这种未来的网络制造一体化工业目前正在由不同的制造商在他们的制造车间进行测试。

为了应对这些挑战,人们必须考虑到来自工业、研究和教育的合作伙伴之间所需的密集合作以及工人在未来网络工厂中的作用,包括提供培训和继续教育必要的技术技能(详见第8章)。例如,是一个研究项目“开放平台自主工程,机电整合自动化组件(OPAK)”,该项目的目标是为工厂开发人员提供信息和通信技术的辅助功能,从而允许工程工作。一个制造工厂的所有设计步骤,从计划到试运行,到所有的操作和修改的调试,由一个合适的新自动化架构、方法和工具支持,应该由OPAK项目(http3 2015)简化。OPAK是由联邦德国经济与能源部(BMWi)在工业4.0计划的范围内支持的(http4 2015)。

330

开发人员将能够通过使用适当的工程工具来规划生产过程,从而专注于所需的自动化过程。随后,自动化过程将变成业务现实,而无需重大的安装、控制和调试工作。工程师不再使用抽象变量或输入输出信号,而是直接通过基于3D的工程界面与可感知的物理工厂功能进行交互。这些条目将自动连接到功能完备的、机电自动化组件。这些组件将包括从机械、电子和软件到统一连接到手动和维护信息所需的所有操作。自动化组件的机电接口技术将实现真正的“插入即生产”,也称为“工业4.0模式中弹性制造系统”的概念。这种方法的动机是对生产模块的产品和功能的特性进行描述,使得通过模拟当前的工作环境来确定最佳的工厂布局。当确定优化潜力时,将会对制造系统进行重组。插件和产品功能将使模块能够登录到主机,并传送它们的技能。它们将被纳入制造过程规划,并将颁布新的生产能力、交付和性能规范。这种制造计划是根据制造订单的生产过程的自动化重组。在未充分利用的情况下,可以向合作伙伴提供可使用的能力或制造模块,以供它们在现有协议中使用。此外,生产线可以跨越公司进行组合。

因此,以前复杂的安装、连线、配置和系统集成将被简化到最小规模,这代表了从集中式到分布式控制体系结构的模式转换。这将使未来的工程过程更加直观、更快、更有效。

随着物联网在工业制造领域的出现,要联网的大量组件以及网络制造一体化的产业需要相应数量的互联网地址。互联网协议第6版(IPv6)是最新的IP修订,它将跨互联网路由。IPv6的推出取代了IPv4。IPv6是由Internet工程任务组(IETF)开发的,以克服长期预期的IPv4地址耗尽问题。因此,IPv6地址使用八组四个十六进制数地址,在每组(16位)由一个冒号



(;) 区隔, 像这样: xxxx:xxxx:xxxx:xxxx:xxxx:xxxx:xxxx:xxxx (x 是一个十六进制值) 这种表示法通常称为字符串表示法。

$2^{128} = 34\ 02\ 823\ 669\ 093\ 846\ 346\ 337\ 460\ 743\ 176\ 211\ 456$  个地址

这意味着, 数值 34 和它后面的 37 个数字是对未来的一种标志。因此, 网络制造一体化产业是这个前所未有的全球网络的名称。从此, 网络制造一体化工业假定制造机器将会更加智能化、网络化, 并且收集需要的数据来提高生产力和效率。此外, 网络制造一体化工业是制造业融合的一个关键领域, 它通过更强大的互连来进行信息交流。设备、材料和特定信息交流是网络制造一体化工业的特征。

331

智能设备 (例如智能手机、平板电脑和 RFID 芯片) 将成为这一研究的重要组成部分。在制造业中, 智能系统支持工人的手工劳动。“智能组件”这个短语指的是自包含的、自动运行的机电组件。在未来, 组件的自我管理将更加常见, 从而在控制级别上进行工作。要实现这种智能的网络制造一体化工业系统, 技术必须不断发展, 例如精密工程和微系统技术。在未来的生产线中, 该产品将把它的数据存储在 RFID 芯片中, 并在任何时候都能传送自己的制造指令。制造过程中的每个传感器和执行器都有自己的 IP 地址, 因此可以寻址。因此, 可以实现定制的产品和高质量的批量生产, 快速适应市场需求的变化。不仅产品生命周期缩短, 而且工厂大门之外的世界也在发生变化, 因为整个生产过程的逻辑正在发生变化。智能机器和产品、存储系统和资源将始终与信息通信技术保持一致。这将发生在整个价值链上, 从物流到制造业, 从市场营销到服务, 都需要先进的制造设备。此外, 数字网络可以全天候工作。据推测, 到 2020 年, 将有 500 亿个组件在网络制造一体化工业中相互通信 (http5 2015)。

然而, 除了数字化带来的所有积极影响之外, 人们还必须意识到隐藏的风险和危险。如今, 网络犯罪的盛行已经成为一个严重的问题。最后但同样重要的是, 日益复杂和相互依存的数字技术可能导致新的网络攻击形式, 这些网络攻击具有内在的威胁潜力。因此, 在不影响数字化的机会的情况下, 对这些安全问题的充分回答是必要的 (见 7.5 小节)。

除了开发新技术之外, 还需要说明人类将来在未来的制造过程中处于何处, 以及如何组织人与技术之间的相互作用。这一主题包括未来制造业的劳动力培训和技能发展问题 (详见第 8 章)。

至少有四种技术元素为网络制造一体化工业提供了基础。这些包括 (但不限于) 以下四种元素。

332

- 网络: 思科公司的研究表明, 在制造车间里, 只有 4% 的设备实际上与网络相连。许多制造商过去曾使用过专有网络。网络制造一体化工业环境需要一个标准化的以 IP 为中心的网络, 它将使工厂内的所有设备都能够与运营和企业的业务系统进行通信。标准的 IP 网络还将使其与供应商和客户之间的联系和合作更加容易, 从而改善供应链的可见性。制造商需要强大的网络, 该网络能够应对工厂的无线电频率挑战、恶劣的环境条件以及警报和实时数据流处理的可靠性。例如, 通用公司实现了一种标准化的网络架构, 称为“工厂地面控制网络”(PFCN), 以标准化每个工厂网络的设计, 并建立一个单一的工程团队, 在全球范围内监视和解决网络运营问题。PFCN 帮助通用汽车减少了大约 70% 的网络停机时间 (Lopez Research 2014)。
- 安全: 设置智能工厂最常提到的障碍是 IT 安全。操作管理人员将需要确保在解决方案中内置安全程序, 例如硬件加密、物理构建安全性和传输数据的网络安全。网络还必须允许安全的远程访问系统。安全和网络解决方案也必须经过设计, 以承受恶劣的环境条件, 例如热和潮湿, 而这些环境是典型的网络所不能承受的。身份验证和身份验证结构也需要进行更新, 以支持人与物。



- 软件系统：今天的物联网数据与我们用来操作系统的数据不同。它需要从各种各样的传感器中收集大量的数据。这些软件系统和模型必须将来自物理世界的信息转化为有用的结论，供人类和机器使用。例如，丰田公司正在利用罗克韦尔的软件进行工厂的实时错误校正。随着改进的故障诊断能力和错误修正，丰田已经在阿拉巴马州的工厂中减少了返工和报废率，这导致了巨大的年度成本节约。
- 智能数据而不是大数据分析：虽然制造商多年来一直在生成大数据，而不是智能数据，但企业在分析和有效使用所有可用数据方面的能力有限。新的智能数据概念支持实时数据流分析，可以在实时解决问题和降低成本方面提供巨大的改进。因此，人们认为智能数据和分析将是预测、主动维护和自动化等领域的基础。康尼格拉公司为客户生产 800 种不同类型的产品。它使用“用物联网构建更智能的制造”预测工具和服务来预测价格、容量需求和客户需求。这使得公司可以通过改进利润决策和增加 5% 的产能利用率来实现收入最大化。

333

7.4 开放式和封闭式生产线

正如 7.1 节所介绍的，生产线是在制造环境中建立的一系列的连续操作，通过这些工序，零件被重新组装起来，制造出一种适合用来制造一种产品的消费品或部件。在大型制造环境中，制造通常需要一个制造车间运送零件到另一个生产车间。在一种情况下，生产线上的零件数量是由运输者的数量所限制的，这条生产线是关于运输线的封闭式结构。

图 7.7 中显示了一个封闭的生产线  $M$ ，在图 7.7 中，空的运输缓冲区  $b_0$  具有  $C_0$  的容量，而在封闭的生产线上的运输者的数量是  $S$ 。

由于在一个封闭的生产线上，第一台机器可能会处于等待状态，而最后一个被  $b_0$  阻塞，封闭生产线的生产率  $PR_{clm}$  最多等于开放生产线的生产率  $PR_{om}$ 。在不适当地选择  $C_0$  或  $S$  或两者的情况下，封闭生产线的行为阻碍了性能，因此  $PR_{clm}$  可以大大低于  $PR_{om}$  (Li and Meerkow 2008)。在文献中，在假设机器遵循伯努利或指数可靠性模型的情况下，分析了封闭的生产线 (Biller et al 2008)。

伯努利线是与所有机器具有相同周期时间的同步线，其可以由机器可靠性参数和缓冲器容量的向量  $(p_1, \dots, p_m, N_1, \dots, N_{m+1})$  表示。它是具有机器的循环时间  $\tau$  的分槽时间模型。在开始时确定每台机器的状态，并且在每个时隙结束时，确定缓冲器的状态。机器的状态为 UP，概率为  $p_i$ ，机器的状态为 DOWN，概率为  $(1 - p_i)$ ，并且与过去历史和剩余系统的状态无关。如果 UP 机器的下游缓冲区在上一个时隙结束时已满，它就会处于阻塞状态，则下游机器无法生成。如果在上一个时隙结束时，它的上游缓冲区为空，它就会处于饥饿状态。在时隙结束时，既不阻塞也不饿的 UP 机器从其上游缓冲区中移除一部分，并在其下游缓冲区中添加一个部分。第一台机器从未饿死；最后一台机器从未阻塞 (Li and Meerkow 2008)。

334

指数分布是一个简单的分布，只有一个参数，通常用于建立可靠性数据。

假设机器  $i, i = 1, 2, \dots, m$  的处理时间是参数为  $\mu_i$  的指数，并且在每个机器前面有一个大小为  $N_i - 1$  的缓冲器。工作正在运输载体上循环流转，使工作处于固定的方向，使工作更容易处理运输。一旦作业在机器  $m$  处完成，它将从载体中移除，并且新的作业立即放置在载体上，然后返回机器 1。循环载体的数量为  $b_j, j = 1, 2, \dots, l$ ，如图 7.7 所示，载体的数量及其容量会影响封闭式生产线的吞吐量。如果载体的数量和容量很小，吞吐量就会很低。如果载体的数量和容量很大，则会出现高吞吐量。



的驾驶舱，监控车辆数据

这一黑客行为展示了信息空间如何被用来影响信息空间之外的物理生产过程（Brazell 2014）。同样的情况也可能发生在数字制造/工业4.0中，如果一个黑客在远程办公，劫持了制造车间的各种各样的特征。这种类型的黑客可以通过停止整个生产线，取消装配步骤，或者改变生产系统中的装配步骤，对制造过程产生巨大的影响。这些例子说明了为什么在联网制造系统协调工作时需要网络安全。

信息安全的要素包括（http7 2015）：

- 应用程序安全性；
- 信息安全；
- 网络安全；
- 灾难恢复/业务连续性计划；
- 用户教育。

然而，信息安全最成问题的因素之一是安全风险快速和不断演变的本质。传统的方法是将大部分资源集中在最关键的系统组件上，并防范已知的最大威胁，使一些不太重要的系统组件不受保护，系统暴露在一些不那么危险的风险中。这种方法对于当前的信息物理环境来说是不适合的。信息安全专家认为，传统的保护CPS信息的方法可能变得难以管理，因为威胁环境已经变得不可思议地复杂。因此，可认为CPS容易受到网络攻击，因为它们基于网络的可访问性使它们容易受到远程攻击。在CPS中，信息和物理组件的整合可以使新的类别的漏洞用于拦截、替换或从通信通道中删除信息，从而导致网络攻击者恶意地试图捕获、破坏CPS操作或使其产生缺陷或失败。这个新漏洞的原因可以追溯到CPS的信息和物理组件的整合方式（Karim and Phoha, 2014）。在这个脆弱的空间中，信息组件提供计算/处理、控制软件和感官支持，并促进对来自不同来源的数据的分析和CPS的整体运作。正如参考文献（Karim and Phoha 2014）所描述的那样，远程网络访问促进了CPS的各种物理分布式或并发协作单元之间的高效交互，而系统管理是网络组件的一个不可分割的组成部分，它具有可访问的权限。然而，这种可访问的权限为发动网络攻击提供了一个入口，会导致：

- 有缺陷的操作（如果攻击影响控制回路）；
- 拒绝服务，这在网络领域是很常见的；
- 破坏和漏出；
- 信息腐蚀。

这些攻击不仅对信息部分产生了巨大的影响，而且对整体的CPS也有很大的影响。

在一个有缺陷的操作中，参考文献（Cardenas et al 2008）报告了在这种网络攻击下生存性的解决方案。当信息攻击创建一个人为机制，使目标系统保持不必要地忙碌、延迟或拒绝合法请求的服务时，造成拒绝服务（Mirkovic et al.）。如果可以检测和消除系统损害，可以避免破坏和清除、信息损坏和系统故障操作。正如参考文献（Karim and Phoha 2014）所报道，许多静态、动态和混合解决方案都可用于分析程序代码中的模式和签名以及程序执行的行为，以便识别系统中恶意代理的存在，帮助系统管理员禁用它们（Dinaburg et al 2008；Sharif et al. 2008；Willems et al. 2007；Moser et al. 2007）。

作为分布式的物理基础设施，CPS的物理组件是受影响的区域。它们被传感器网络监测，用作早期预警系统，同时检测故障或损坏。这些传感器网络由许多微小的组成部分组成，每一个组成部分都要进行物理捕获。信息攻击可以移除或摧毁来自影响区域或感兴趣区域的传感器，从而在安全覆盖范围内造成一个漏洞，导致关键数据的传输中断。信息攻击还可以破坏或

[336]

[337]

取代传感器，并向系统中注入错误数据，从而导致决策传感器依赖于数据的失败。目前已经提出了一些方案，例如概率依赖图和异常检测，通过检测传感器数据的缺失、腐败或重放，从而检测出漏洞，探测或识别漏洞的传感器节点，从而发现了从外部对操纵行为的检测（Karim and Phoha 2014）。

概率依赖图方法（He and Zhang 2010）说明了使用由最小邻域系统引起的马尔可夫随机场（MRF）的连接，这可以通过在相邻站点之间插入边实现（Li 2009）。因此，它利用相量测量单位和统计假设检验的空间相关信息。我们假设使用高斯马尔可夫随机场（GMRF）来模拟整个空间（连接网络和物理组件的总线）上的相角，使得相角被评估为随机变量，并且可以研究其相关性（Rue and Held 2005）。GMRF 的成对马尔可夫属性以这样的方式进行，即 MRF 是平均值  $\mu$  和方差  $J^{-1}$  的正态分布，其中  $J$  是马尔可夫随机场的信息矩阵；因此， $J$  为零（Landrum et al. 2014）。因此，概率依赖图可用于故障检测和定位，因为可以测量可靠性以确保 CPS 所预期的功能。

异常检测可用于识别信息攻击以保护 CPS。首先，必须对入侵方法进行标识，以使 CPS 的常规操作保持不受干扰。信息攻击可以以多种方式进行。要意识到信息攻击者对 CPS 的组件或子系统的入侵，必须使用异常检测算法。它的措施包括实时监测、对入侵可能影响的分析以及缓解措施（Ten et al. 2011）。实时监控 CPS，使算法能够快速、有效地确定计算/处理单元、传感器和其他应用程序的状态，从而允许实现最大数量的连接，并通过响应时间和 IP 地址对连接进行身份验证。可以根据时间和频率，对组件或子系统至关重要的文件进行破坏性修改来检测和跟踪异常，例如不成功的登录尝试，并确定行为。这些是尝试入侵的特征，如果怀疑有网络攻击，则会创建可能的攻击者的警报列表，并且锁定入侵者试图攻击的组件或子系统（Landrum et al. 2014）。

数字制造/工业 4.0 中使用的 CPS 解决了许多紧迫需求，但也容易受到数字制造/工业 4.0 系统中可能导致各种类型的损坏或操作关键任务的条件的困扰。因此，关键任务需要一个持续活跃的 CPS，基本上永远不会失败，因为对条件的脆弱性可能导致关键任务系统失败。因此，CPS 应考虑两个主要问题：

- 安全；
- 保险

在整个数字制造/工业 4.0 系统中，安全性对于关键任务系统是不可或缺的。为了获得最佳安全性，由于分布式计算/处理设备的相互作用和相互干扰，因此必须关注计算/处理设备与物理组件之间交互的安全性。此外，受监控条件导致的物理现象的影响，可能会影响网络设备的功能。在 CPS 设计中需要解决和防止这些安全问题（Guy et al. 2014）。

保险性定义为“确保系统的数据和操作能力只能在授权时才能访问的能力”（Banerjee et al. 2012）。因此，对 CPS 任何组件的未经授权的访问都构成了明显的安全威胁。在数字制造/工业 4.0 中的关键任务运营中，越来越多地使用 CPS，因此，安全总是处于设计的前沿，这是很有必要的。

据参考文献（Harris 2014）的信息安全报告显示，2012 年，所有网络有针对性的网络攻击中有 50% 针对员工人数不足 2500 人的企业。更重要的是，有 31% 的网络攻击目标是那些拥有不到 250 名员工的企业。但是作为集成供应链的一部分，或者是敏感数据和知识产权，一些小型企业也可以访问业务合作伙伴的计算/处理系统。可以认为，攻击小企业的回报要小于大型企业的收益，但大多数小企业投入很少资源用于保护信息资产，因此是容易的信息攻击或网络犯罪目标。

与此同时,已经开发了一些信息安全标准即用来预防或减轻信息攻击的数字安全技术,因为敏感信息现在经常存储在依托互联网的计算机/处理设备中。就某些标准而言,可以获得认证机构的网络安全认证。获得认证有很多好处,包括获得网络安全保险的能力。

ISO/IEC 27001:2013 是国际标准化组织(ISO)和国际电工委员会(IEC)于2013年10月发布的ISO/IEC 27000 标准系列信息安全管理体系统标准的组成部分。ISO/IEC 27001:2013 正式规定了一种管理系统,旨在明确的控制下获取信息安全。除ISO/IEC 27001 外,ISO/IEC 27002 是网络安全的高级指南。作为管理组织获得ISO 27001 标准认证的指南是最有益的。该证书一旦获得,将持续3年。根据审计机构的不同,3年内不得进行任何中间审计(http8 2015)。

ISO/IEC 21827 (SSE-CMM-ISO/IEC 21827) 是基于系统安全工程能力成熟度模型(SSE-CMM)的国际标准,可以测量ISO控制目标的成熟度(http9 2015)。

信息安全论坛(ISF)发布的“信息安全最佳实践标准”是一个以业务为重点的、实用的、全面的指导,用于识别和管理组织及其供应链中的信息安全风险。2011年“最佳实践标准”是4年来最重要的标准更新。它包括信息安全热点话题,例如消费者设备、关键基础设施、网络犯罪攻击、办公设备、电子表格和数据库以及云计算。2011年“最佳实践标准”符合ISO/IEC 27000 系列标准中规定的信息安全管理体系统的要求,并提供更广泛和更深入的ISO/IEC 27002 控制主题以及云计算、信息泄漏、消费者设备和安全治理(http8 2015)。

北美电力可靠性协会(NERC)1300 标准称为关键基础设施保护(CIP)002-3 至 CIP-009-3,这些标准用于保护大型电气系统,尽管NERC 在其他领域制定了标准。大型电气系统标准还提供信息安全管理,同时仍然支持最佳实践工程流程(http10 2015)。

国际自动化协会(ISA)安全合规研究所(ISCI)为IEC 62443 工业和自动化控制系统(IACS)信息安全标准运行了第一个合格评定方案。该程序认证了商业现货(COTS) IACS 产品和系统,用于确保IACS 供应链的安全(http11 2015)。

国家标准与技术研究所(NIST)特别出版物800-12 为计算机安全和控制领域提供了一个广泛的概述,它还强调安全控制的重要性和实现安全控制的方法。最初,该文件针对联邦政府,尽管文件中的大多数做法也适用于私营部门(Guttman and Roback 1995)。

此后,在制造业CPS 中的安全性需要通用的安全方法来实现,这些方法包括对意外可见的行为进行补救,从而在制造CPS 中加强信息的安全性能。这意味着相关的制造商CPS 遵守信息流动属性(IFP)  $P$ 。但是,有时会出现导致破坏  $P$  的事件,从而导致可解释为超出预计制造进度的影响。这导致事件被认为是潜在的制造安全风险。如果此事件被识别,则安全系统立即将补救事件或将一系列事件插入到当前执行的一系列制造过程中。这种补救事件链的任何个别过程都可能破坏  $P$ ,但补救行为的执行速度足以使破坏行为不明显。在补救事件链的结论中,观察者会看到  $P$  属性被坚持遵守,就像破坏事件从未发生过(Guy et al. 2014)。

## 7.6 数字制造/工业4.0 案例研究

本节介绍了一系列引入工业应用和德国研究议程的特殊案例研究,这些研究议程正面对当今制造业的变化,因此,这些机构/行业已经开始考虑如何实施数字制造/工业4.0。

### 7.6.1 汉诺威中心的生产工程(PZH)方法

随着物联网的出现,一个新的工业时代开始了。这究竟是一场革命,还是一场进化,还有待决定。可以肯定的是,随着日常生活中各个领域的进一步数字化,一个根本性的变化正在发

生。因此，互联网与其他现代技术相结合，给制造业的影响越来越大。在各领域不同规模的全球公司都在使用数字化来确保他们的竞争力，并且在不久的将来能够提供更好的产品。在这方面，德国具有潜力成为与工业 4.0 相结合的数字化的国际市场领导者。对于中小型企业而言，为此目的所需要的技术仍处于起步阶段。因此，最近成立了工业 4.0 平台工作组，其中包括来自商界、学术界、协会、工会和政府部门的代表 ([http12 2015](#))：

- WG 1 参考体系结构、标准和标准化；
- WG 2 研究与创新；
- WG 3 网络系统的安全；
- WG 4 法律框架；
- WG 5 工作、教育和培训。

它提供了关于标准化、安全性、网络化、系统集成领域以及联邦经济与能源部倡议“Mittelstand 4.0” ([http13 2015](#)) 计划的示范中心等问题的咨询服务。为此目的，2016 年，在德国全境建立了五个信息和示范中心 ([http14 2015](#))。新的示范中心的目标是在数字化转型中支持中小企业。新举措旨在加强中小企业和工艺企业的竞争力，并在数字化和工业 4.0 的背景下发展新业务。

其中一个中心位于汉诺威生产工程中心 (PZH)，该中心属于德国汉诺威莱布尼兹大学。位于 PZH 和汉诺威综合生产研究所 (IPH) 的机构汇集了整个供应链生产中心的专业知识。其他专业知识，例如 IT 安全或法律，由其合作伙伴提供。由此产生的 PZH 投资组合跨越了信息、资质、咨询和实施等领域。汉诺威制造工程中心 (PZH) 的基地如图 7.9 所示。

341



图 7.9 汉诺威制造工程中心 (PZH)

PZH 是全国乃至全世界最重要的制造技术研究中心之一。与此同时，位于 PZH 的莱布尼兹大学的 7 所研究机构也有 250 名科学家，其中大部分来自工程和自然科学。在 PZH 的组织下，这些机构的员工不仅可以从事专业领域的工作，还可以致力于 TEWISS GmbH 公司的工程服务，以及众多的中小型生产企业，其中许多都是 PZH 研究所的衍生产业。活动在基础研究、与工业伙伴的多样化研究合作以及实践教学等方面都是公平分配的。在 PZH 的年度报告中描述了目前在研究所进行的研究和对 PZH 的活动的概述，每一份杂志都包含了前一年的年度报告 ([http15 2015](#))。

PZH 的一个项目是协调研究中心 CRC 653 “生命周期中的智慧组件——产品工程中的遗传组件信息的使用”，其成立于 2005 年，该项目在 2011 年被引入之前开发了工业 4.0 的基础。关于 CRC 653 进行的创新性研究，本质上通过相关处理步骤来存储信息的生产和发现方式，同

342 时没有外界控制，设备自主监控自己的条件和在必要的条件下要求检查，这也将很快成为现实。这些组件以及在生产工程中制造和创新的创新概念、方法和技术，将作为 CRC 653 在 PZH 的跨学科研究的结果而被开发。CRC 653 的跨学科长期目标是将组件与其相应的遗传信息以及生命周期中的压力信息进行整合。这个想法在图 7.10 中进行了总结。

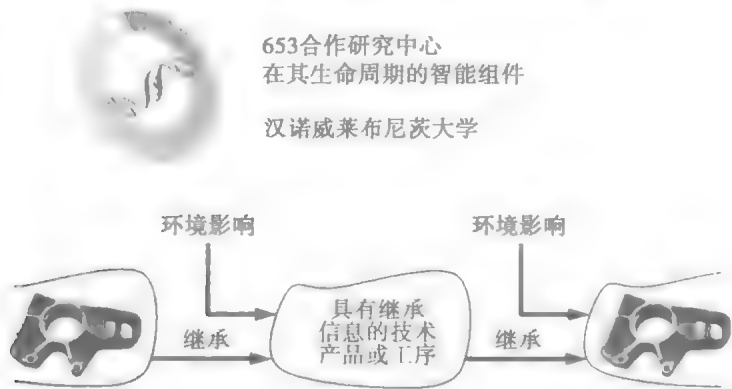


图 7.10 CRC 653 的长期目标图解——制造工程与机床研究所（IFW）许可

CRC 653 和大多数关于工业 4.0 的活动主要由 PZH 研究所之一的制造工程与机床研究所（IFW）推动。IFW 已经开发了十多年的“感知”机床等具体解决方案，使生产计划和控制更加有效。该机器配备了额外的智能来检测制造误差和自身的状态信息，这些信息不断地反馈到生产计划和控制中，以便使这些步骤更加准确，特别是在新产品的加工阶段。IFW 的前提是将智能设备相互连接，但这不应该是本身研究的结束。所以第一步是分析企业内应该优化的流程。第二步是确定工业 4.0 如何帮助实现这一优化。这个前提也是 IFW 在 2015 年创立的生产创新网络（PIN）的基础，应加强企业之间的工业 4.0 合作。

来自 CRC 653 的研究科学家应用的一个流行例子是学生方程式赛车，它们围绕方向盘存储了大量比赛信息，并使得它们的维护计划非常简单和方便，如图 7.11 所示。

1. 交互式维护

343 根据 2013 年的报告“Maintenance Efficiency Report 2013”，只有 55% 的维护活动是增值的过程。由于工具或组件的等待时间和复杂流程的组织程度不足，维护部门的工作会发生延迟。为了减少额外的工作量，IFW 正在开发一个用于交互维护的移动平台，该平台可以收集有用的信息，例如错误原因，以及工具等资源，如图 7.12 所示。此外，工作步骤的个性化展示可以用来培训没有经验的工人。在实现了交互式维护平台之后，他们期望增值过程的增加至少达到 79%。这符合行业中最佳实践应用程序的现行标准。

在 2015 年，IFW 实现了示范平台、数字化的维修和维护助理（DRIA），并通过 QR 码识别机器。员工可以通过密码获得这些信息。如果遇到可用数据无法解决问题，员工可以通过基于网络摄像头的系统来获取同事的支持。解决问题的工具是在相关面板中提供的。

目前，IFW 认识到以下发展潜力。

- (1) 动态：精确定位工人和机器的位置，以便更详细地描述工作过程的信息；
- (2) 实时显示：在相关组件上显示工具或与机器相关的数据（例如，来自生产的数据）；
- (3) 带有可拆卸显示器的笔记本电脑；带有集成摄像头的操作文档；
- (4) 来自动态和实时显示的开发工具包；新应用程序的编程（例如，为了让 DRIA 成为一个更专业的人）；



图 7.11 a) 将工业4.0嵌入到学生方程式赛车的方法；b) 设计、生产和使用之间的各个阶段——制造工程与机床研究所（IFW）许可

(5) 数据库/云：工作流程和员工技能的集中存储。

与此同时，IFW 计划编写专门的制造应用程序软件。这个软件总结了不同程序的当前功能组合（例如 ILIAS）



图 7.12 交互式维护平台——制造工程与研究所（IFW）许可

2. 流程规划 4.0

在工业 4.0 的背景下，IFW 正在进行下一步，即所谓的流程规划 4.0，如图 7.13 所示。下面列出了实现这一目标的步骤。

步骤 1 问题定义：

- 在初始阶段计划和启动制造执行系统（例如，输入计划数据，如计划时间和工作计划）；



- 自主流程规划，预先假设有关个别功能的生产过程的知识；
- 随着时间的推移改变计划数据（例如根据学习效果，分散修订工作计划）；
- 计算机辅助计划系统中的静态计划数据；
- 维护工作水平高，计划不精确，缺乏认可；
- 数据表生产数据收集（PDC）和机器数据采集（MDC）尚未使用

步骤 2 目标：

- 制定动态学习过程规划的方法，为有效的和可操作的应用提供必要的基础；
- 通过使用生产数据进行自动的动态学习过程规划；
- 减少制造执行系统的启动和维护工作；
- 提高规划准确性，增加接受程度。

步骤 3 解决方案：

- 开动态学习过程规划的方法，借助于实时数据和对不具有足够有效性的制造执行系统的反馈；
- 根据机床数据和数控程序代码检测单个功能的生产类型；
- 本体或数控程序中的反馈（例如，工具路径）；
- 整合质量特性进行验证；
- 工业伙伴的原型实现和业务使用。

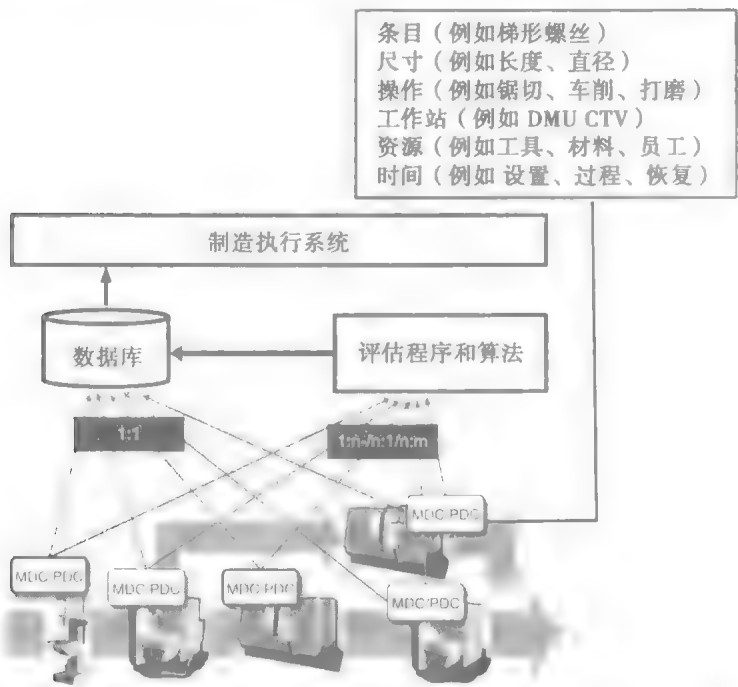


图 7.13 工业 4.0 原型中的过程规划 4.0——制造工程与研究所（IFW）许可

3. 感知机器

子项目 N1 代表 SFB 653 的中心示范项目。在实施、使用和潜在性能方面，对功能机床组件中的“智能技术”进行了系统地研究。子项目的重点是寻找“智慧组件”以及这些组件之间的相互作用和生命周期信息的继承。随着提出的研究工作的推动，其愿景是实现一种有“感觉或感知”的机器。目的是通过分布式、多样化的固有感官能力来检测任何过程、机器或工件。

状态。这些功能将不断改进在线流程评估和形状误差预测过程模型。该方法使用测量的加工过程数据，并同时对其进行模拟。所应用的数据源可以分为主要和次要数据源。主要数据源提供数据，无需进一步转换即可使用。操作过程压力、机床的位置信息以及由测量传感器提供的表面信息采样是此方法中使用的主要数据来源。次要或增强的数据源利用主要数据来生成基于模拟的附加信息。该仿真由机床的流式位置值驱动的，并确定有效的切削条件，例如切割深度、切割宽度和材料去除率。所有获得的和生成的数据集都有一个时间戳，它允许在离散的步骤中关联系统状态，如图 7.14 所示。

从图 7.14 中可以看出，聚合过程数据用作训练数据集，以建立多参数过程模型。到目前为止，该模型基于支持向量机，并且对于所考虑的参数实现了 5% 的平均标准误差。模型训练后，它用于在线评估切割过程。该模型还用于通过模拟力或没有施加的力预测模拟过程的形状误差。通过最近的数据和过程条件修正模型，使预测精度不断提高。

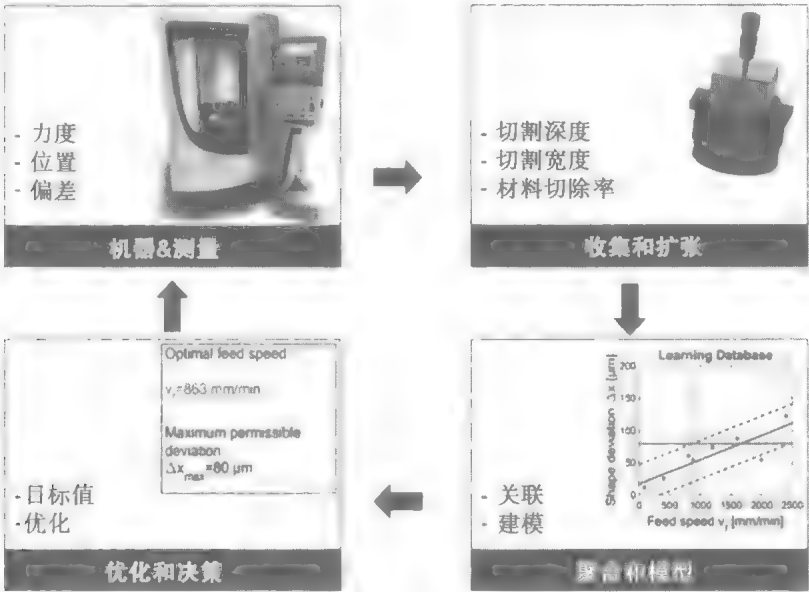


图 7.14 感知机器方法——制造工程与研究所（IFW）许可

4. 结论

关于SFB 653 研究工作目标及其结果，以及最近建立的 PIN 网络，知识转移在更广泛的基础上提出，推动了工业 4.0 的相关研究问题。SFB 653 发言人和 PIN 发起人 Denkena 教授相信：“我们正在进行一场至少 10 年并且和 10 个不同机构相互作用下的研究。如果我们现在能建立起一个强大的公司网络，在这种网络中不仅有双边的经验、知识和研究交流，而且公司也会互相激励，这对未来每个参与者都会有极大的促进。”

347

7.6.2 钢铁行业的方法

炼钢是用于从铁和铁矿石以及废料生产钢的制造工艺。在炼钢中，从原铁中除去氮、硅、磷、硫、过量碳等杂质，加入锰、镍、铬、钒等合金元素，生产出不同质量等级的钢。在国际竞争中，钢铁工业继续使制造工艺现代化，从而提高生产率和质量。因此，对现代设备和员工培训的投入已经改变了钢铁行业。

在接下来的十年里，物联网、数据和服务（IoTdS）将把人、流程、数据和事物结合在一起。

348

起。如果所有这些都在一起，它将为未来开辟新的可能性。信息物理系统是一种协作计算元素的系统，它将成为钢铁行业创新的驱动因素。自主的、自我管理的制造流程，以及基于云的数据支持和服务，将构成新的服务和业务模型的平台。在这种意义上，信息物理系统（见第 3 章）可以作为一个强大的数字平台，良好的结构和良好的集成在指定的制造过程中非常必要。因此，基于 CPS 的制造工艺将根据外部要求独立和自主地进行制造生产线的控制。另外，经济增值链、定制化、按需化、实时制造流程等在这个过程中可以被优化。

数字制造/工业 4.0 模式的转变将使钢铁行业的解决方案基于存储、物流和服务的网络，例如，在合适的传感器和执行器技术上。在数字制造/工业 4.0 的帮助下，整个钢厂供应链中的对象可以随时被识别和定位，从而减少了负荷和等待时间，降低了物流成本。因此，数字制造/工业 4.0 模式所提供的信息和通信技术将能够在不久的将来将制造设备和原材料供应商连接起来。这将使钢厂生产过程和原材料供应商之间的数据自动交换，从而优化工作供应链。在这方面，生产过程将立即对供应链中的变动迅速做出反应。

长期以来，在钢铁企业中实施了生产工艺优化。在过去的 25 年里，随着现代信息和通信技术的支持，实现了制造过程的自动化。这导致了许多创新技术的发展，使其更具成本效益、更有效的生产流程、可持续的质量改进以及其他的新发展。此外，这使得在质量和交付方面实现了客户需求的增加。

到目前为止所描述的钢厂活动可以在数字制造/工业 4.0 智能工厂的背景下进行整合。正如 7.1.2 节所描述的，一个智慧工厂代表着一个智能的工厂。在一个智能工厂的中心，自主流程的相互关联是一个关键问题，因为它们根据不同情境控制自己，甚至包括知识、传感器和空间分布的制造资源（制造机器、机器人、传输和存储系统、公用事业等），包括它们的计划 and 控制系统。因此，智能工厂的特点是一致的工程方法，它结合了制造过程以及制造产品本身，通过 CPS 将信息和物理世界无缝地连接在了一起。在不久的将来，一家智能工厂生产出来的产品可以通过它们的产品代码共享机器的效用来控制它们自己的生产过程，显示哪些需求是必要的，下一步需要哪些生产步骤。通过这个平稳的过渡，一个聪明的工厂、智能产品、智能数据（见 7.1.2 节）和智能服务可以更好地利用智能的制造能力，同时节约资源，为增值的经济链和就业开辟新的可能性。

[349]

在钢铁厂的生产中，最重要的任务之一是开发一种最有效的技术，通过水平的、综合的数字技术，以尽可能低的成本生产出高质量的钢材。钢卷产品从熔体车间出现，热轧、冷轧和精加工工序顺序排列。所有这些制造步骤需要优化调度才能有效运行，但是对于所有这些进程同时创建计划相对复杂。

成功提高炼钢效率的另一个关键是收集、分析和解释制造过程中的智能数据。其结果是来自水平集成制造过程监控系统的输入。这有助于确定钢厂的情况，作为预测和定期维修服务的基础，以避免计划外的停机、对产品质量的意外影响，以及昂贵的设备损坏。总的来说，这将导致钢铁生产的整体生产率提高，同时保持高水平的产品质量和生产运营。由于智能数据分析的结果，交付可靠性和交货期可以得到改善，库存水平也会降低。此外，操作者可以确信，生产过程和材料是最优的，如果没有运行的订单，机器只会被维护。此外，更少的质量问题将减少客户投诉和错误的生产。从这个意义上说，智能数据是每一次生产步骤收集的数据，它们可以被聚合至效率系数，例如生产过程的关键性能指标。为此，可以通过利用公司定义的语义模型来连接和管理不同的数据，从而获得智能数据。在这方面，语义模型允许数据由相应的经营理念连接，并且元数据和数据一起运行。因此，其优点在于，对设备性能和停机时间的详细分析将使整个制造链上的连续过程得到改进。

另一个关于资源的问题是在炼钢中节约能源，这是一个主要的经济和环境问题，因为钢铁行业是能源消耗最密集的行业之一，能源是运营成本的主要部分。一般来说，能源成本占总生产成本的 20% ~ 30%。通过提高能源意识和相关的节能措施，可以避免很大一部分成本。在这种背景下，钢铁行业的流程优化非常重要，因为能源成本占钢铁生产成本的很大比例。通过优化的、链接的流程步骤，可以在工业 4.0 中实现改进。在温度最高的热轧机上运行钢板，如图 7.15 所示。由于技术原因，对于某些特定合金是强制性的，并且这套机制可能适用于所有产品。

[350]



图 7.15 钢坯在热轧机中——Salzgitter Flachstahl GmbH 授权

在综合的冶炼厂中，来自高炉、炼钢厂和焦化厂的加工气体用于发电和蒸汽。通过在数据分析基础上开发合适的预测模型，根据机器或工艺数据，确定最佳的时间来替换磨损部件，从而降低生产和维护的成本，从而降低总成本。这不仅节省了维修和更换磨损部件的频率，还降低了成本和材料（见 7.6.3 节）。

在个别工业 4.0 的应用中，已经形成了一些成熟的新策略，可以应用于钢铁行业（例如，动态过程优化可应用于减少钢铁制造业的仓储）。这取决于是否需要单独的工艺步骤，因为对连续的产品生成过程的要求不同，需要具有半成品材料的中间仓库。使用中间仓库的约束是尽可能少的资本。因此，通过具体的数字化解决方案，可以实现生产过程的整体规划，从而最小化资金投入和加速生产，从而使生产计划和控制更加有效。一种切实的解决方案可以应用于线圈，因为线圈通常存储在多层中，目标是减少不必要的线圈运动的数量，如图 7.16 所示。



图 7.16 线圈仓库中制造出来的线圈——Salzgitter Flachstahl GmbH 授权

在钢铁工业中，将工业 4.0 方法应用于实践的一个更普遍的方面是对钢铁生产中的几个过程进行

建模 模型简化了现实,使其复杂性易于管理。可以应用的模型类型是基于数据的。有了这种类型的模型,你就不能像图 7.17 所示的那样去看真正的钢转换器,这并不意味着没有关于这个过程的信息。基于大量的过程变量,例如温度、气体、压力等,可以建立模型。单个生产过程对产品性能的影响可以通过经验的关系或物理模型来描述。因此,可以更有效地优化单个流程,并确定它们的限制。在工艺规划和控制方面,所需的产品质量和特性可以用最少的技术和最少的工作来进行。这使得能够在早期阶段评估产品特性,从而开始纠正措施。



图 7.17 钢转换器—Salzgitter Flachstahl GmbH 授权

另一个问题是自动产品控制,这取决于前面的生产步骤的结果。每个过程步骤都会在一定程度上影响产品的属性。这也可以通过模型或经验关系来描述。随后的过程步骤可以进行调整,以获得比以前更好的结果。这需要一个可以将这些限制考虑在内的计划工具,尽管各个进程有限制。对于半成品,需要快速地决定是否要继续深加工,其他的工作能否被确定,产品是否一定会贬值。这个过程计划需要一个强大的工作管理和计划工具。

上述所有的特性都有一个内在的特点:质量。质量保证必须考虑到过程数据的错误分析与一些流程参数相关的简单的、可识别的上下文的产品缺陷通常很快就会被消除。仅在过程参数的某些组合(可能的几个生产步骤)出现的错误更难以识别或分析。在这里,需要更智能的机器学习工具来根据相关参数执行数据挖掘。对大数据集的数字化的数据挖掘分析涉及在人工智能、机器学习、统计和数据库系统的方法。出于这个目的,基于正确参数的限制是绝对必要的(例如,从大数据转移到智能数据范例)。如果查看在钢厂的过程中收集的所有数据,通常不能提供有意义的结果,因为不能识别伪相关性,而且相关参数和不相关参数具有很强的差异性,这些参数在狭义的范围被控制,因此通常不会提供有意义的结果。因此,需要具有高分辨率的有意义的参数的智能数据管理概念,用于具有相应分辨率的质量相关参数中的故障分析和状态监视(维护)。

### 7.6.3 博世软件创新方法

“工业互联网:把愿景付诸实践”是博世软件创新有限公司(Bosch 2015)针对机器和组件制造商的白皮书的标题,旨在通过物联网获得竞争优势,推动其服务业务向前发展(见第4章)。在这种情况下,预测性维护的例子为工业互联网的原则和利益提供了一个非常有力的例

证“工业4.0”或“工业互联网”一词是指智能制造技术相互关联的制造业的第四种模式的转变（见7.1节）。制造业和互联网日益增长的互连在经济利益方面提供了巨大的潜力，特别是机器和零部件制造商。通过连接他们的产品和扩大其服务范围，包括新的软件解决方案，他们有机会利用新的市场潜力，开展有效的竞争，在最佳情况下可以获得比竞争对手高出一个量级的优势。本节中的相关描述也基于上述白皮书，并经博世软件创新有限公司的许可。

服务业务在工业4.0中扮演着重要的角色。由于零售业务的标准化增加，为了应对日益减少的服务收入，机械制造商需要开发新的商业模式，因为传统机械制造商提供的服务通常是他们业务中利润最丰厚的部分。

诸如远程访问和数据分析之类的新技术正在引发对服务业务的关注。通过将机器连接在制造流程上，公司可以在实时操作期间访问机床数据（见7.1.2节）。智能评估这些数据可以为诸如此类的问题提供新的见解：

- 什么在这方面起作用？
- 什么样的功能会导致错误？

这些见解可以为开发基于需求的服务和应用程序提供基础，并为实际使用提供优化产品功能，从而对产品价格产生积极的影响（见7.1.3节）。

在实践中，很难知道从哪里开始和从什么时候实现真正的工业4.0。创新的应用程序和服务真的能提供明显的附加值吗？什么时候值得投资一个工业4.0项目？一般来说，通常公司内部有许多不同的想法，需要采取什么方法，没有定义如何推进的策略。关键的挑战之一是要认识到工业4.0的实现不是一个线性过程。在很多情况下，新的业务潜力直到工业4.0项目进展顺利，甚至完成后才会显现。这期间可能会出现许多机会，每个机会的后果都难以评估。因此，有时需要对工业4.0项目进行重大投资，而不需要对产品的盈利能力进行清晰的财政预算，因为组件或机器制造商正在通过创新进入未开发的领域。

对于组件和机器制造商而言，工业4.0世界的一个切实可行的第一步是扩大和优化其现有服务。使用传感器和软件对部件和机器进行配置，可以自动收集各种各样的现场数据。通过连接组件和机器，可以接近实时检索数据，并将其聚集在一个中央位置。在大多数情况下，解释这些数据所需的知识已经在公司内部得到了。这种技术可以作为规则来建模，并自动应用于数据。可以使用定制的软件在单个平台上直观地对制造车间的各个部件和机器获得的信息进行可视化和监视。

这就产生了极大的透明度。所有的数据都以一种面向应用程序的格式提供，这使得识别错误或偏差变得更加容易，并确定它们的确切性质，其结果是响应时间大大缩短。

有能力在任何时候读取机器和生产流程的状态，并在出现问题时采取有针对性的行动，这对公司的服务业务和市场地位的提升都是一个重大的改进。但制造商可以更进一步，应用数据分析，让他们准备和分析积累的数据，以便将新的洞察转化为具体的服务。为了达到这个阶段，有必要为产品配备传感器或软件，以生成第一步所需要的数据。这种数据的存储可以作为决策的基础，从而决定哪些服务是可提供的，因此应该由相关公司提供。

如图7.18所示，工业4.0创新周期描述了在工业4.0模式中开发现有业务和新服务的持续过程。创

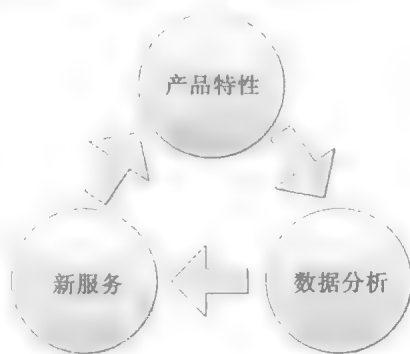


图 7.18 工业 4.0 创新周期——博世软件创新有限公司许可

新周期由一个公司在连续的过程中经历的三个阶段组成，也可以并行地执行这几个阶段

355

产品特性阶段的目的是使机器和部件具备工业4.0的特性，包括传感器、执行器、信息处理系统和定制的应用软件。此外，机器和组件需要一个网络接口，以便在应用程序的区域内提供无线或有线网络连接，以便能够访问它们。

### 1. 通过数据分析获得知识

除了实现现有服务的优化之外，对机器的访问也为收集大量数据提供了可能。很重要的一点是要清楚地规定应该收集数据以满足每个案例的目标。目标可能包括减少维修成本，减少生产过程中的成本，或降低生产过程中偏差的成本。累积的数据包括历史数据和当前数据，并构成数据分析的基础。重要的是不要低估所获得的数据的数量和复杂性。大量的传感器、组件和机器通常会生成大量的数据，这一现象通常称为大数据（见7.1.1节）。

数据分析实质上是一种建模和获取知识的手段。目标是识别数据中的模式，并在此基础上开发预测模型。模式是物理世界中数据形式或一系列事件的表示。在数据分析的背景下，描述性分析和预测性分析是有区别的。描述性分析的目的是压缩数据并识别模式。这些模式形成了预测性分析的基础。通过使用许多不同的技术（例如，统计方法、建模和机器学习），预测未来可能发生的事情是可能的，例如预测某一事件或情况发生的概率。为了预测事件，分析当前数据流，以检测已知的模式。如果识别出模式的一部分，那么可以预测模式的其余部分将发生的可能性，从而可以预测物理世界中的某个事件。

356

在理想的情况下，新获得的信息可以用于帮助自动化决策过程

#### 示例 7.6.1 改进加工流程质量

通过分析过程数据，可以识别出在制造过程中质量的偏差，从而识别出以前未知的模式。这种技术可以以更加微妙和差异化的方式描绘质量趋势，以获得对制造过程质量的全面了解。它能够随着时间的推移确定质量趋势，并在发生故障之前对问题做出反应。

这种详细的数据分析形式有另外的好处。在没有进行过程数据分析的情况下，一些故障和偏差将通过整个过程。数据分析可帮助制造企业降低故障和报废成本。此外，可以分析趋势，以确定优化机器或组件的使用方式。

#### 示例 7.6.2 分析机器数据，以便在早期发现磨损

任何制造公司的目标是尽可能长时间地保持部件的运转，以便最大限度地利用它们的服务生命周期，减少材料的使用。目前在工业中有两种主要的维护方式：反应性和预防性。在反应性维护中，只有在技术问题出现时，才会修复机器和部件，而导致的停机时间通常会增加成本。在预防性维修中，昂贵的磨损部件通常在预先的间隔内更换，这是一种预防性维护，在这种情况下，部件通常被替换得更频繁，从而导致资源、人力和材料的浪费。

通过使用数据分析开发出一种合适的预测模型，可以确定最佳的时间来替换磨损的部件，这是基于机器或工艺数据。通过减少磨损部件的处理和更换频率，节省了维护和维修的时间，这一策略也减少了材料的使用。在生产线上，这些关键部件越多，在维修区可以节省的钱就越多。与此同时，这种方法可以通过在早期阶段识别磨损的部件故障，从而将计划外停机时间减少到最小。

### 2. 维护的新业务模式

在未来，机械和零部件制造商将能够在他们的服务业务中创造更大的利润空间。一个例子是优化状态监测与相应的服务协议。这涉及通过远程访问监控机器和组件，并在需要时自动触发维护和服务。记录的数据由服务提供商分析，以便识别可能表明零件即将磨损的模式或机器

处于即将发生故障的风险。

这种类型的服务为预测性维护铺平了道路。机器状态数据提供对劣化和潜在故障的洞察力，而过程数据可以根据机器的状况和所需的维护或服务而得出结论。例如，与规定的周期时间的偏差可能表明机器设置不是最佳的。

连接产品并配备适当的传感器、执行器和软件是这种商业模式的必要前提。一旦对机器的访问变得方便，传统的服务（例如反应性维护管理）可以以一种优化的方式提供。该服务提供有关故障和偏差的详细信息以及所采取行动的全面记录。制造商本身从这些新业务模式中获益，因为预测性维护使他们能够及时订购备件，从而避免不必要的存储成本。

毫无疑问，公司将能够通过基于现有的工业 4.0 技术的新业务模式在未来创造收入。但是，这种综合商业模式在预测性维护领域有何形式？由瑞士圣加仑大学开发的所谓的“魔法三角”，生动地说明了这种项目是如何在实践中进行开发。从图 7.19 中可以看出模型定义，预测维护的四个维度——谁去做、是什么、怎么做和收益——考虑内部因素和外部因素，并对所有涉及的问题形成全面的看法。

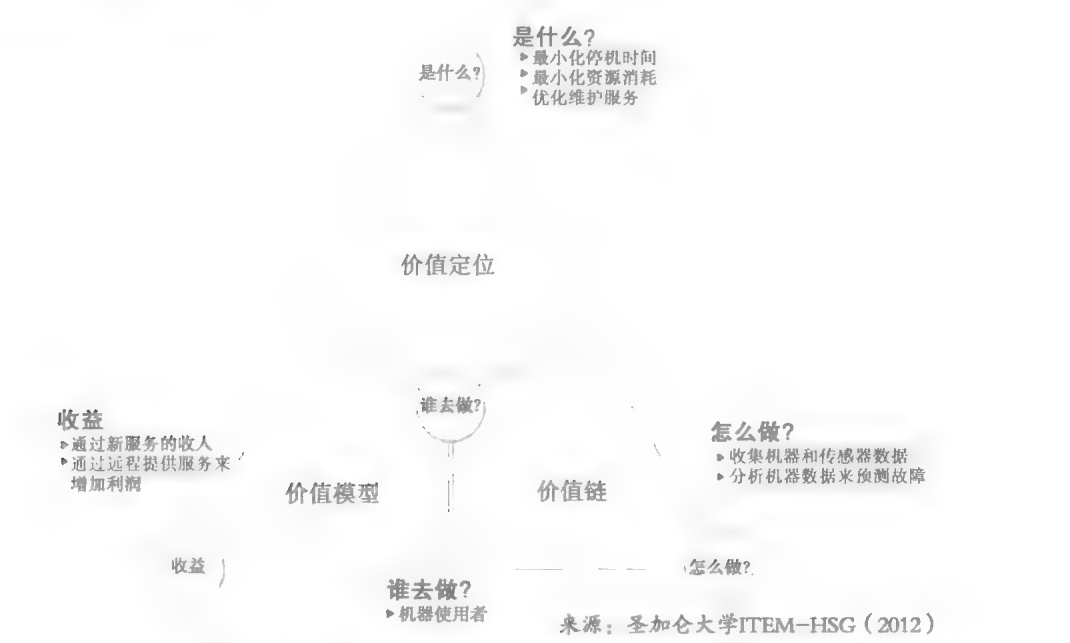


图 7.19 魔法三角——博世软件创新有限公司许可

第一个问题、“谁去做？”很容易回答。机器和组件制造商以及组件开发人员将在现有的客户群和新客户中指导这种商业模式。通常，这些客户将是工业制造企业，换句话说，就是机器、系统和组件的用户。

第二个问题、“是什么？”解决客户提供的问题。预测性维护使机器制造商能够在早期阶段在客户站点上进行维护，以应对即将发生的机器故障。这使得机器制造商能够向客户提供新的服务，例如保证机器的可用性，同时减少自己的资源消耗。除了为预防性维修任务分配更少的员工，机器制造商也可以在只有在很可能出现即将到来的问题时才能更换备件。同时，用户可以从最短的停机时间和相应较高的制造产量中受益。

第三个问题的答案是：“怎么做”。当前的机器状态是用传感器技术记录下来的，并自动检查模式。这样可以在早期检测到可能的故障，并避免机器故障。

所有这些因素加在一起，为机器制造商提供了额外的价值或“收益”。他们能够为现有投



资组合添加新服务,以创造额外的持续收入来源。此外,制造公司由于优化措施节省了资金。这为机器制造商带来了另一个直接的好处,因为客户满意度的提升保障了他们的业务,并帮助机器制造商脱颖而出。另一个优点是预测性维护需要远程访问机器和系统。这样就可以从远距离进行维护工作,这对制造商的服务业务利润产生了积极的影响。

因此,当涉及工业4.0的时候,许多制造公司都在等待一项关键技术的出现,然而,制造业和互联网的日益互联带来了巨大的潜力。现有服务的优化已经产生了新的商业模式,特别是对于机器和部件制造商。应用这些模型的唯一步骤是通过整合传感器、执行器和信息处理软件,使产品和工业4.0做好准备。一旦建立了这些基础,就可以对机器和过程数据进行分析,并在此基础上进行优化。预测性维护只是工业4.0众多可能的应用程序的一个例子。从长远来看,机器零部件制造商将从不断增长的客户满意度和更高的营业额中受益,对其服务模式的持续发展进行更大的贡献。

#### 7.6.4 保险业务方法

工业4.0、物联网、实时在线、大数据和数字化都是时下热门的流行语。它们反映了保险业正在寻求其未来可行性的新现实。但除了技术层面,客户行为是一个复杂的问题,它从产品开发、市场营销、分销到执行管理、财务报告和风险管理等各个方面都对保险业产生了重大影响。

保险业过去几年的表现与该行业及其高管的最初评估相反,其特点是利率持续保持在较低水平。自2008年的金融危机爆发以来,欧洲和美国的利率一直处于历史最低水平。在金融危机开始时,业内的最高管理者们给出的行业估计仍然是非常乐观的。日本与金融危机的关系还在持续。这些力量在欧洲和西方世界是无法想象的。这是一个根本性的错误。与此同时,全球十大保险公司被指定为所谓的“具有系统重要性”的公司。

人寿保险以其原有的传统形式,正在演变为一种新的商业模式。寿险公司仍然持有大量的合同,保证超过3.5%的利率。几十年来,这些模型保证了利息兑现,但它们现在已经过时了,不再具有可行性。此外,人寿保险公司还受制于新的立法,这是金融危机的结果,而且它们仍然处于紧张的状态。偿付能力II指令(Solvency II Directive)和额外的利息储备已经成为了行业关键词。现在特别强调的是人寿保险改革法案(LVRG)的合同条款,LVRG对德国现有分销商的后果尚不明朗。政策制定者就这一问题发表了声明,似乎对保险业构成了威胁。如果保险业不能自行降低佣金水平,就会制定相关法律,创造一个全新的局面。这些例子在荷兰和英国都是众所周知的。

德国的保险公司正试图根据他们的个人情况来应对这种情况。德国保险协会(GDV)正在施加政治压力,以防止最坏的情况发生。

由于投资收入的下降,这些公司被迫获得低于100%的索赔/费用比率(合并比例)。由于预期的最高可达8%以上,合并后的比率将达到90%~92%。在金融危机之前获得的利润至少产生了100%的合并比率。大多数保险公司都在汽车和住宅建设等大众市场,多年来,他们一直没有经历过困难,直到价格战开始,而这种情况在这个行业会反复出现,有时甚至是不必要的。这给保险公司造成了巨大的损失。一段时间以来,他们实施了一种基于高级分析的控制策略,取得了积极的效果。

再保险市场现在也面临压力,因为以前不为人知的市场都被财力雄厚的参与者占领。他们正迫切要求提高再保险的保费,由于越来越多的、且不可预测的自然灾害(NatCat),该保费实际上应该会上升。

可以得出的结论是,已经使用了100多年的保险业传统商业模式已经受到侵蚀。它主要依

据的代表是一个男性,40岁,不吸烟,有固定收入,没有失业的历史。

除了前面提到的一般市场条件之外,还有一些挑战,主要是数字化。数字化是一个模糊的概念。这一概念的核心是什么,没有人能准确地解释,尽管所有被询问的人都能清楚地定义数字化。因此,数字化对保险业的意义是不明确的。数字化常常是指现有的过程和产品。运行一个Web门户来分发产品似乎是数字化的。

“数字化”和“大数据”的流行词目前主导着保险业的主题。大量资金用于跟踪与商业情报系统相关的门户网站战略和项目。

值得注意的是,与其他行业相比,尽管付出了巨大的努力,保险业还没有降低标准,尤其是在资金投入方面,而且近年来还经历了裁员。总的来说,保险业仍然沿用落后于行业最现代概念的概念。通过利用主要用于捕获客户信息的智能/大数据数字化概念,保险公司可以提供更精确的做法和更好的风险预测,使他们的业务更有利,这种情况直到今天还未出现。展望当今在社交媒体上的信息,很多保单持有人的数据都可以在任何地方找到,比如在Facebook页面上,这些数据可以获得大量的信息。

因此,可以得出的第二个结论是,数字化并不是纯粹的技术问题;数字化更像是保险行业的一个文化问题。

在保险业,人们关注的焦点是所谓的“暗处理和标准化”,尤其是在私营部门。在企业 and 工业客户部门,这种方式是非常困难的。因此,与制造或半制造业相比,生产率仍然维持在一定水平。

关于数字化和大数据的挑战,保险行业的问题与其他行业不同。这将是使整个行业以及个体公司对未来准备的一条道路。这需要对市场和客户、供应商、企业组织以及员工和管理层的行为和态度进行反思。

因此,数字化可以理解为政治和社会发展。在现代社会和政治体系中,沟通和信息的问题是最重要的。数字化从根本上改变了活动者在这些社会和政治体系中的沟通方式。参与者都是参与这些系统的人和机构。通信的移动设备都是专门为这一目的而开发、建造和操作的技术和物理系统。我们这个时代最重要的系统是互联网,它使通信能够跨越整个地球,称为全球化。这意味着,在这个全球网络中,每一个参与者都必须找出他的位置和角色,才能在这样一个世界里生存下去。因此,数字化只是网络、连接和链接的另一种表达方式。

对于保险公司来说,重要的是要扮演一个角色和位置,并重新定位自己,并获得地位,尽管这对公司在地区或全球市场的运作有很大的影响。在德国,绝大多数保险公司都是积极的。

关于个别公司的情况,需要制定适当的策略,以保持公司在市场上的独立性和可行性。因此,不同寻常的挑战在于互联网时代所有活动的扁平化和可持续性。如果移动技术有可能改变整个索赔过程,那么在缺少或缺乏专业知识和改造现有信息处理系统的情况下,可能会危及公司的存在。

由于客户行为的变化和市场环境的变化,企业架构将会发生深刻的变化。因此,传统的、功能性的意见声明并不重要;需要执行或面向流程的观点。尽管所有的声明都会使用“进程”这个词,只有在很少的保险公司(如果有的话)存在过程的观点,更不用说以过程为导向的工作方式。这意味着生产方式(即生产和分配)不符合当今制造业常见的生产线的复杂要求。此外,失去了进入数字时代必不可少的许多要求。

关键是公司需要从制造业驱动的生产过渡到工业生产。这个工业过程是基于在符合现代制造企业要求的工业化过程中发挥作用的所有相关方面。这些要求背后的各个方面有所不同,每一个都有其个人含义。目前,数据需求得到了突出显示。在这里,正如保险行业经常发生的那

样，其他方面或多或少被遗忘，或被忽视。不追求整体的方法。使用模拟科学方法来模拟多种情景下的客户行为可以帮助投资行业更全面地了解社会和政治发起的市场变化。

但是如何才能实现新的局面呢？下面是一些注意事项。其中一些已经进行了测试，还有一些还需要制定和实施。

[362] 目标是实现实时的、受控的过程。数据的质量在正确的时间和地点的一致性过程设计的一个主要障碍。

此外，还不清楚数据上的哪些问题将被处理。只有经过正确选择的问题，才有可能进一步得到正确答案。

另一个技术方面涉及数据的处理。首先，必须收集数据，并提供数据。然后，它们必须按照规定的要求进行快速处理，并正确地转发、存储和检索。对于当前可用的系统，特别是在后端系统和分布式应用程序之间的通信中，发现了不匹配的现象。专家们仍在争论，这些系统之间的平衡应该是怎样的。仍有个问题被重复地提出，简单的客户端，还是笨重客户端，当你看到现代 IT 架构的发展可能时，会发现这个问题是一个过时的问题。

因此，在开始数字化或保险业 4.0 之前，必须提出以下 6 个问题，并得到令人满意的解决。

- (1) 什么是结构化的？信息系统设计方法。
- (2) 谁负责设计？信息系统设计的参与者。
- (3) 它在哪里构建？信息系统设计标准。
- (4) 它将如何设计？信息系统设计方法。
- (5) 它将在哪里设计？信息系统设计水平。
- (6) 是什么原因导致了结构性问题？信息系统设计的度量标准。

为了得出架构设计的注意事项以作为数字化挑战的基础，我们必须展示参与者之间的关系，特别是在彼此的合同安排方面的关系。只有当一家保险公司清楚地看到这样的架构应该如何从外部和内部的角度来看待平衡的结构时，它可能会走过数字化的困境。这需要新的报告度量标准，以确保公司能够开发出有效的度量标准和通信框架。在 PWC（2015）中，有报道称，这些指标的一个显著特征是，它们有共同的关键原则，为公司制定有效的指标和通信框架提供了保障。只有这样，我们才有理由相信，未来的投资将会取得成功，不会打水漂。该通信框架由数字分销渠道构成，通过该渠道，保险产品和援助服务作为保险公司提供的新集成解决方案的一部分提供。从这个意义上说，服务将是新解决方案包的主要组成部分，使它们能够在不断增长的市场中处于有利地位。图 7.20 显示了数字化战略的几个组成部分，其中包括服务。

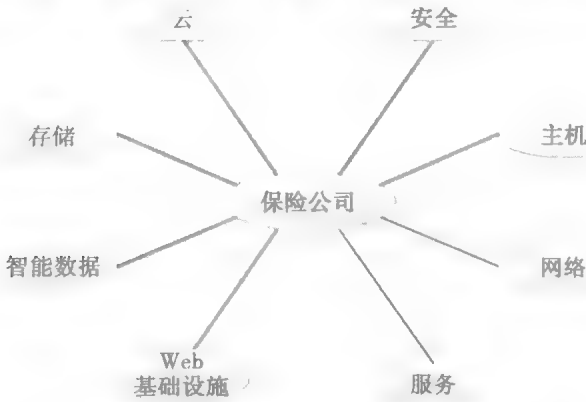


图 7.20 保险公司数字化所需的组成部分

在可行的服务方面，客户和合同的模型如图 7.21 所示，它指的是一个可行的索赔/伤害平台。

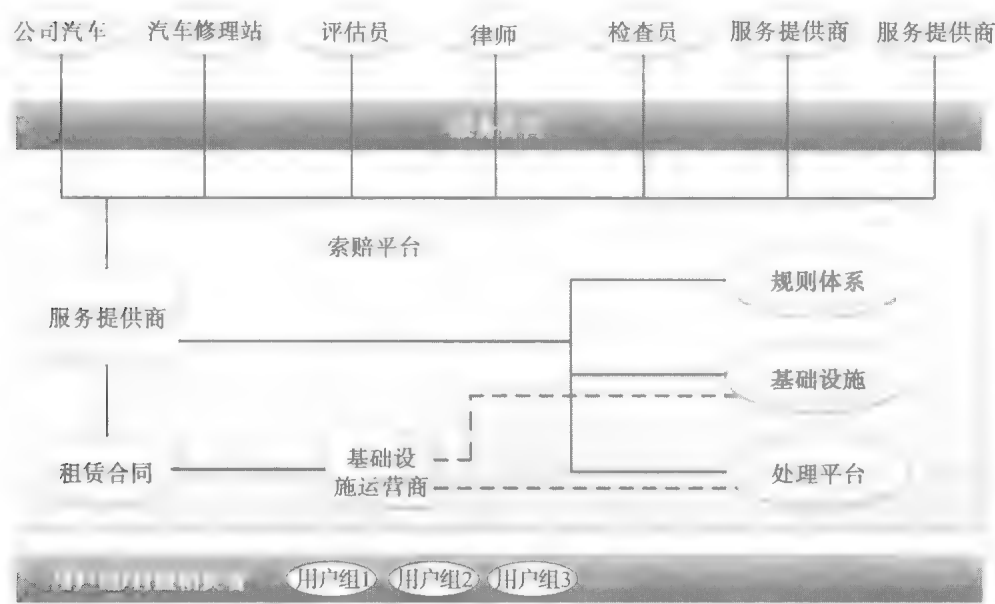


图 7.21 作为潜在索赔/伤害平台的一部分的客户和合同模型

正如参考文献（Mayr 2013）所报道的那样，援助服务提供商可以在紧急情况下自动通知，这将使他们能够协调即时援助和索赔结算过程。此外，基于联网对象和服务的产品为保险公司提供了直接和永久访问其目标群体的机会。这使他们能够根据他们的个人需求给他们的客户提供报价。日常使用和与网络产品的互动使公司获得有价值的信息，帮助他们了解客户的当前情况和需求，并提供与当前情况相匹配的更多产品和补充服务。

这也可能包括一家公司的合作伙伴的产品和服务。如果客户体验是良好的，则加强了他们对服务供应商的信心。这产生了新的商业机遇（Mayr 2013）。

7.6.5 德国工业 4.0 工作组方法

“工业 4.0 工作组的最终报告，执行战略计划的建议”（Kagermann et al. 2013）的摘要表明，德国具有世界上最具竞争力的制造业之一，是制造业设备行业的全球领导者。德国强大的机械和工厂制造业、其在全球范围内的 IT 能力水平以及在嵌入式系统和自动化工程方面的专业知识，意味着它在制造业工程领域处于领先地位。德国在发掘新型工业化潜力方面具有独特的地位。工业 4.0 将涉及 CPS（详见第 3 章）在工业过程中的制造和物流以及物联网（详见第 4 章）的技术整合。这将通过智能制造、商业模式、下游服务和工作组织对价值创造产生影响。

智能制造或智能工厂（见 7.1.2 节）将满足个人客户的需求，甚至可以使一次性产品的生产成为可能。它们还将带来创造价值和新颖商业模式的新方法。特别是，它们将为初创企业和小型企业提供开发和提供下游服务的机会。同时，也有必要创建服务于为 CPS 技术和产品的新的前沿市场。为了实现这一双重 CPS 策略的目标，应该实现以下几个特性。

- 通过价值网络进行横向集成：通过价值网络进行横向集成的建模、设计和实现；
- 整个价值链的端到端数字集成：信息和物理世界将整合到整个产品的整个价值链中，

363  
364

同时也整合了客户需求；

- 垂直整合和网络化制造系统：CPS 将用于制造灵活且可重构的制造系统

365 如果要成功地实施工业 4.0，则需要在适当的产业政策决策的陪同下进行研究和开发活动 工业 4.0 工作组（Kagermann et al. 2013）认为，在以下八个关键领域中需要采取行动

（1）标准化和参考体系架构：工业 4.0 将涉及通过价值网络对不同公司进行联网和集成 只有开发单一的共同标准，这种合作伙伴关系才是可能的 需要参考体系架构来提供这些标准的技术描述，并促进它们的实现。

（2）管理复杂系统：产品和制造系统正变得越来越复杂 适当的规划和解释模型可以为管理日益复杂的工业 4.0 提供基础 因此，工程师应该配备开发这种模型所需的方法和工具

（3）全面的宽带基础设施：可靠的、全面的、高质量的通信网络是工业 4.0 的一个关键要求 因此，宽带互联网基础设施需要在德国及其合作伙伴国家之间大规模扩展

（4）安全与保障：安全与保障对智能制造系统的成功至关重要 重要的是要确保生产设施和产品本身不会对人或环境造成危害 与此同时，生产设施、产品，特别是它们所包含的数据和信息，需要得到保护，以防止滥用和未经授权的访问 例如，需要部署整合了安全和保障的体系架构和唯一的标识，以及相关的增强附件、培训和持续的专业开发（CPD）（见第 8 章）。

（5）工作组织和设计：在智能工厂中，员工的角色将会有明显的改变 越来越多的实时控制将改变工作内容、工作流程和工作环境 工作组织的方法实施将为工人提供更大的责任和提升个人发展的机会（见第 8 章），这将有必要实施参与式的工作设计和终身学习措施，并启动项目的参考模型。

（6）培训和持续的职业发展：工业 4.0 将从根本上改变工人的工作和能力 因此，有必要实施适当的培训策略，并以促进学习和实现终身学习的方式组织工作，以及工业 4.0 工作场所的持续职业发展 为了实现这一目标，应该对模型项目和最佳实践网络进行推广，并对数字化学习技术进行研究。

366 （7）监管框架：虽然在工业 4.0 中发现的新制造流程和横向商业网络需要遵守法律，但现有的法律也需要进行调整，以将新的创新纳入考虑范围 这些挑战包括保护企业数据、责任问题、处理个人数据以及贸易限制 这不仅需要立法，还需要代表企业采取其他形式的行动，以确保广泛适用的工具存在，包括准则、模范合同、公司协议或自我监管措施，例如审计

（8）资源效率：除了高昂的成本外，制造业对大量原材料和能源的消耗也对环境和供应安全构成了威胁 工业 4.0 将会带来资源生产力和效率的提升 在需要投资智能工厂和衡量节约成本时是非常有必要计算额外资源的取舍。

### 1. 物联网、数据和服务的角色

物联网、数据和服务（IoTDaS）将使创建包含整个生产过程的网络成为可能，将工厂转变为智能环境 信息物理制造系统由智能机器、仓储系统和制造设备组成，这些设备已经被数字化地开发，从内向物流到制造、市场营销、外向物流和服务，都具有端到端信息和通信技术（ICT）的集成 这不仅可以使制造业更加灵活地配置，而且还将拥有利用差异化的管理和控制流程提供的机遇。

因此，除了优化现有的基于因特网技术的流程之外，工业 4.0 也将在全球范围内开辟更为差异化的跟踪详细流程和整体效应的潜力，这是以前无法记录的 工业 4.0 还将涉及商业伙伴（例如供应商和客户）之间以及员工之间更密切的合作，为双方提供新的合作机会

总的来说，可以说明物联网、数据和服务（IoTDaS）将成为制造行业的关键推动者，因为

工业 4.0 将涉及 CPS 的技术集成到制造和物流中。这将对价值创造、业务模型、下游服务和工作组织产生影响。

## 2. 工业 4.0 的潜力

工业 4.0 工作组认为, 工业 4.0 具有巨大的潜力, 这在以下论题中有所概述 (Kagermann et al. 2014)。

- 满足个人客户需求: 工业 4.0 允许在设计、配置、订购、规划、制造和运营阶段纳入个别的客户特定标准, 并允许在最后时刻进行更改。在工业 4.0 中, 可以制造一次性产品, 并且生产数量很低, 同时还会盈利。
- 使德国能够进一步巩固其作为产区、制造设备供应商和 IT 业务解决方案供应商的地位: 令人鼓舞的是, 德国的所有利益相关者正在通过工业 4.0 平台紧密合作, 以推进与实施。
- 灵活性: 基于 CPS 的特设网络可以实现业务流程不同方面的动态配置, 例如质量、时间、风险、稳健性、价格和环境友好性。这有助于对材料和供应链进行连续的调整。这也意味着工程过程可以变得更加敏捷, 制造过程可以被改变, 暂时的短缺 (例如, 由于供应问题) 可以得到补偿, 并且在短时间内可以实现产量的巨大增长。
- 优化决策: 为了在全球市场取得成功, 通常在很短的时间内能够做出正确的决定变得至关重要。工业 4.0 提供了实时的端到端的透明度, 允许在工程领域进行设计决策的早期验证, 在面对中断和对全球范围内生产地的优化时提供更灵活的响应。
- 资源生产力和效率: 工业生产过程的总体战略目标仍然适用于工业 4.0、从给定的资源量 (资源生产力) 中交付尽可能高的产品产出, 并使用尽可能少的资源来交付特定的产出 (资源效率)。CPS 允许在整个价值网络的基础上对生产流程进行优化。更重要的是, 在生产过程中, 可以在不停止生产的情况下对资源和能源消耗或减少排放进行持续地系统优化。
- 通过新服务创造价值机会: 工业 4.0 开辟了创造价值和新就业方式的新途径, 例如通过下游服务, 智能算法可以应用于智能设备记录的大量数据 (大数据), 从而提供创新的服务。对于中小型企业 and 初创企业来说, 为工业 4.0 开发企业对企业 (B2B) 服务的机会尤其明显。
- 应对工作场所的人口变化: 结合工作组织和能力发展计划, 人与技术系统之间的互动合作将为企业将人口变化转化为优势的新途径。面对技术劳动力短缺和劳动力多样化 (在年龄、性别和文化背景方面), 工业 4.0 将实现多种灵活的职业发展道路, 使人们能够持续工作, 并保持生产力。
- 工作与生活的平衡: 使用 CPS 的公司越来越多的工作组织模式意味着他们可以很好地满足日益增长的员工需求, 以便在工作 and 私人生活之间取得更好的平衡, 也可以在个人发展和持续的职业发展之间找到平衡。智能辅助系统将为组织工作提供新的机会, 以提供新的标准来满足公司的需求和员工的个人需求。随着劳动人口的规模下降, 这将为 CPS 公司在招聘优秀员工方面提供一个明显的优势。
- 一个仍然具有竞争力的高工资经济体: 工业 4.0 的双重战略将使德国成为领先的供应商, 同时也是工业 4.0 解决方案的主导市场。

然而, 工业 4.0 不会对相关行业构成技术或互联网技术相关的挑战。不断变化的技术也将对组织产生深远的影响, 为发展新的商业模式和企业模式提供机会, 并促进了更多的员工参与。在 20 世纪 80 年代早期, 德国成功实施了第三次工业革命, 通过将 PLC 集成到制造技术

367

368

中,同时通过一种基于社会伙伴关系的方法来管理对劳动力的冲击,从而实现了更灵活的自动化生产。它强大的工业基础、成功的软件工业以及在语义技术方面的专业知识,意味着德国在实施工业4.0方面处于非常有利的地位。应该有可能克服目前的障碍,例如技术部署问题或劳动力市场中熟练工人数量有限的问题。然而,如果所有相关的利益相关方共同努力,释放出由物联网、数据和服务提供给制造业的潜力,那么德国工业的未来将是有可能实现的。

自2006年以来,德国政府一直在推动物联网、数据和服务(IoTDaS)的高科技战略发展。一些技术方案也已经成功推出。行业科学研究联盟目前正在通过工业4.0项目在跨部门层面实施这一举措。由BITKOM、VDMA和ZVEI专业协会共同成立的工业4.0平台与秘书处合作,是实现该举措的下一个合理的步骤。下一项任务将是有关关键优先论题生成研发路线图。确保德国制造业的未来是工业4.0平台的合作伙伴们为自己设定的目标。该平台邀请所有相关的利益相关方继续探索工业4.0提供的机会,使他们能够帮助确保成功实现其革命性的愿景。

### 7.6.6 美国数字制造与创新设计研究所方法

[369]

2014年2月,由伊利诺伊大学实验室领导的伊利诺伊州联盟是伊利诺伊大学非盈利的研究与开发小组,被选中领导数字制造和设计创新研究所(DMDI)。DMDI通过网络供应链将解决无数设计、工程、制造和维护系统之间的数字数据的生命周期问题。伊利诺伊大学的实验室获得了7000万美元的资金,用于资助DMDI,该机构将从主要行业合作伙伴以及学术界、政府和社区合作伙伴那里获得2.5亿美元的委托,成立一个3.2亿美元的研究所(Selko 2014)。

数字制造是一个具有竞争力的游戏规则改变者,将美国的研究、工程和生产社区以新的、令人兴奋的方式结合在一起。具体来说,先进的材料、高性能的计算资源、建模和仿真工具以及附加的制造实践的结合,使得大企业和小企业都可以设计和构建几乎不可能的复杂的模型和系统,同时可以减少制造成本和周期。国家数字工程和制造联盟是数字制造的合作伙伴,将有助于利用高性能计算(HPC)进行建模、仿真和分析(MS&A)。这种能力可以帮助制造商更快地设计、测试和构建原型产品或组件,从而使他们能够更快且更低成本地将创新产品推向市场(Selko 2014)。

DMDI使美国制造业能够更快地为市场带来创新,从而在全球竞争中获得优势。可以利用集成和推动现代设计、支持制造和产品工序的数字方式,减少产品生产时间并且初运行成功,这是解决企业中产品和制造不断增加的复杂性的唯一可行的方法。

对于未来工厂的展望(见7.1.2节)有许多不同的名称(先进制造企业、智能制造系统、智能制造、工业互联网等)。他们都有一个共同的理解,即成功的关键是网络化的、数据驱动的过程,将创新的自动化技术、传感技术和控制技术与从生产车间到工厂控制到全球供应链的各个层次的转型劳动力相结合。实现这一愿景需要在许多方面进行竞争前期的合作,而DMDI将专注于在机电组件和系统的制造和设计方面的应用。由于复杂性、集成度和成本水平的提高,对于国防部门而言和大多数商业工业部门(包括航空航天、交通运输和能源)也是非常重要的,例如动力传动系统、推进装置和结构部件以及控制子系统和整体系统。DMDI提供一个实验基地,这个场所将有前景的信息技术、工具、标准、模型、传感器、控制、实践和技能联系起来,然后将这些技术转换到工业基础上以进行全面的應用。该研究所将满足跨学科互联网技术整合需求和制造解决方案需求以及促进供应链互操作性的多行业协作需求。研究所将会成为帮助美国制造商成为世界上最好的柔性制造企业的智慧中心,通过数字数据安全地驱动它们,通过传感器和数据分析的反馈控制质量,维护可靠的监管链,交付产品的时间明显少于全球竞争对手。

[370]

## 1. 国家经济的影响

DMDI 将通过在设计、生产和支持方面智慧和全面地利用数字方式,提高美国中小型制造商的全球竞争力,从而消除低成本、低技能劳动力的任何竞争优势。DMDI 方法的一个优点是,该结果将适用于几乎所有的制造业部门,并预计将在整个制造企业中降低大约 10% 的成本,而不仅仅是一个技术或制造流程。工业部署一个 DMD 环境分析了主要的经济部门的潜在收益,其中每个机器、设备和工序都智能地连接在一起,举例来说,仅在 15 年的时间里,商业航空预期节省高达 300 亿美元,而每一个主要的引擎子系统都有内置的智能来预测它的性能。飞行准备可以更有效地计划,部分制造可以更有效地管理。美国国防部 (DoD) 和其他经济部门也有类似的商业案例和投资回报的机会。

## 2. 美国国防部投资原理

美国国防部在确保美国制造业发展成为一个更加灵活、连接、协作和有效的产业方面拥有巨大的利益(见 7.1.1 节)。该部门需要复杂的、高度集成的系统来获得技术优势,但它缺乏开放的市场或容量来推动成本或周期的降低。将智能机电设计和制造能力从实验室转移到原型工厂环境中,将提供高于国防部生产率的生产效率,并减少最终设计错误,大大降低时间和成本,成为国防采购系统的生产决策里程碑。因此,DMDI 将通过应用数字网络和同步的流程和工具,减少采购周期和成本,从而推动复杂武器系统的开发、生产和维持模式的转变,进而形成一个开放的、高度协作的环境。该研究所还将建立和整合对供应链知识记忆进行持续和加强的工序,并提高组织和商业工业基地以负担得起的制造数量少、需求不同且复杂的国防部系统的能力,以支持国家安全。

## 3. 活动描述

为了使研究所成为降低吞并风险的行业资源,并为新技术商业化提供途径,它必须解决跨越所有数字制造方针的技术发展,特别是智慧数字制造的发展。跨越所有发展计划的技术包括在特定环境中展示技术的能力,开发材料和提升劳动力技能以支持市场上的新技术的机会,并确保信息和物理设备中的网络和信息安全。智能机电设计和制造领域的技术进步特征如下

- 数字制造企业:包含敏捷和强大的制造策略和集成功能,极大地降低了生产复杂系统和部件的成本和时间(见 7.1.1 节)。这包括建模和仿真工具的开发和实现,以便更快地进入市场和有效的复杂系统生产。它还包括对产品或生产工序中最小化多重设计、原型设计和保证产品质量的测试迭代的工具和实践,所有这些都通过数字方式连接,以实现设计师、分析师、制造商和维护者的相互协作。
- 智能机器:涉及开发和集成智能传感器、控制、测量、分析、决策和通信软件工具,用于提供持续改进的自动制造。智能机器通过将设备与即插即用设备结合在一起,从而实现了这一理念的第一部分,并允许设备使用来自计划和工序组件(包括大数据分析)的制造知识(见 7.1.1 节)。
- 高级分析:利用高性能计算的先进技术,开发以物理为基础的材料性能模型,并设计出用于制造的工具,这包括开发和集成智能设计工具,以帮助减少过度设计,以降低制造成本。
- 信息物理系统安全:专注于方法和技术,为在高度协作的制造环境中管理信息资产提供安全可靠的基础设施。除了制造业中使用的信息业务系统和交易的已知漏洞之外,未来的工厂还需要解决智能机器、传感器和控制系统中 CPS 的新漏洞(见 7.5 节)。

在美国的工业基地,数字方式的发展和应用有成功的例子。在美国国防部和更广泛的商业



工业企业中,智能机电设计和制造的整合仍存在着障碍。障碍包括建立真正的互操作性、对知识产权利益的有效和平衡管理、维护网络技术和安全、推动机器智能、劳动力技能和新的组织文化的发展,这些新的组织文化采用数字的方式,最大限度地提高美国的工业竞争力。

## 7.7 练习

1. 术语制造是什么意思?
2. 描述制造系统的体系结构。
3. 生产线中作业的意思是什么?
4. 描述生产线中作业的方程式。
5. 术语装配线是什么意思?
6. 描述装配线的结构。
7. 术语敏捷制造是什么意思?
8. 描述敏捷制造的四个关键要素。
9. 术语智能工厂是什么意思?
10. 描述智能工厂的愿景。
11. 工业 4.0 是什么意思?
12. 描述工业 4.0 的愿景。
13. 术语智能数据是什么意思?
14. 举一个智能数据的例子。
15. 术语自动化金字塔是什么意思?
16. 描述自动化金字塔不同级别的任务。
17. 个性化生产是什么意思?
18. 举例描述个性化的生产。
19. 术语网络化制造是什么意思?
20. 举一个网络化制造的例子。
21. 术语封闭式生产线是什么意思?
22. 举一个封闭式生产线的例子。
23. 术语信息安全是什么意思?
24. 举例说明制造业的信息安全。

## 参考文献

- (Askin and Selfridge 1993) Askin, R. G., Standridge, A., C.: Modeling and Analysis of Manufacturing Systems. John Wiley and Sons, 1993
- (Banerjee et al. 2012) Banerjee, A., Venkatasubramanian, K. K., Mukherjee, T., Gupty, S. K. S.: Ensuring Safety: Security and Sustainability of Mission-Critical Cyber-Physical Systems. Proceedings IEEE Vol.100(1), pp. 283–294, 2012
- (Biller et al. 2008) Biller, S., Marin S. P., Meerkow, S. M., Zhang, L.: Closed production lines with arbitrary models of machine reliability. In: IEEE International Conference Proceedings on Automation Science Engineering, pp. 466–471, 2008
- (Bosch 2015) Industrial Internet – Putting the vision into practice. White Paper. Bosch Software Innovations GmbH. 2015; [www.bosch-si.de](http://www.bosch-si.de)
- (Brazell 2014) Brazell, J. B.: The Need for a Transdisciplinary Approach to Security of Cyber Physical Infrastructure. In: Applied Cyber-Physical Systems, Chapter 2, pp. 3–14. Eds.: Suh, S. C., Tanik, U. J., Carbone, J. N., Eroglu, A. Springer Publ. 2014
- Cárdenas, A.A., Amin, S. and Sastry, S.: Secure control: towards survivable cyber-physical systems. Proc. 28th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops, pp. 495–500, 2008
- (Christensen 2015) Christensen, J.: Digital Business: in The Digital Age. Books on Demand GmbH, Copenhagen, 2015
- (Dinaburg et al. 2008) Dinaburg, A., Royal, P., Sharif, M., Lee, W.: Ether: Mailware Analysis via Hardware Virtualization Extensions. Proceedings of the 15th ACM Conference on Computer and Communication Security, pp. 51–62, 2008
- (Fahmida 2011) Fahmida, R. Y.: GM's OnStar, Ford Sync. MP3, Bluetooth possible Attack Vectors for Cars. In: eweek.com. IT Security and Network Security News, March 16th, 2011; <http://www.eweek.com/a/Security/GMs-OnStar-Ford-Sync-MP3-Bluetooth-Possible-Attack-ectors-for-Cars-420601/>.
- (Görllich et al. 2007) Görllich, D., Stephan, P., Quadflieg, J.: Demonstrating remote operation of industrial devices using mobile phones. In: Proceedings of the 4th International Conference on Mobile Technology, Applications and Systems, pp. 482–485, 2007
- (Guttman and Roback 1995) Guttman, B., Roback, E.: An Introduction to Computer Security: The NIST Handbook. National Institute of Standards and Technology: Special Publication 800-12, 1995
- (Guy, S., Boyle, E., Hu, F.: Cyber-Physical System Security. Chapter 9, pp. 125–133, In: Cyber-Physical Systems, Ed.: Hu, Fei. CRC Press, 2014
- (Harris 2014) Harris, K. D.: Cybersecurity in the Golden State. Privacy Enforcement and Protection Unit, California Department of Justice, 20134

- (He and Zhang 2010) He, M., Zhang, J.: Fault Detection and Localization in Smart Grid: A Probabilistic Dependence Graph Approach. *Proceed. 1st IEEE Internat. Conf. on Communications*, pp. 43–48, 2012
- (Iacocca 1991) 21st Century Manufacturing Enterprise Strategy. An Industry-Led View, Volumes 1 & 2. Iacocca Institute, 1991
- (Kagermann et al. 2013) Kagermann, H., Wahlster, W., Helbig, J. (Eds.): Recommendations for implementing the strategic initiative Industry 4.0 – Final Report of the Working Group Industry 4.0. Office of the Industry-Science Research Alliance Secretariat of the Platform Industrie 4.0, 2013
- (Kaplan and Haenlein 2006) Kaplan, M. M., Haenlein M.: Toward a parsimonious definition of traditional and electronic mass customization. *Journal of Product Innovation Management*, Vol. 23, Issue 2, pp. 168–182, 2006
- (Karim and Phoha 2014) Karim, M. E., Phoha, V. V.: Cyber-physical Systems Security. Chapter 7, pp. 75–83. *Applied Cyber-Physical Systems*, Eds.: Suh, S. S., Tanik, U. J., Carbone, J., N., Eroglu, A., Springer Publ. 2014
- (Kidd 1994) Kidd, P. T.: *Agile Manufacturing: Forging New Frontiers*. Addison-Wesley, 1994.
- (Landum et al. 2014) Landrum, R., Pace, S., Hu, F.: Cyber-Physical System Security – Smart Grid Example. Chapter 10, pp. 135–152. In: *Cyber-Physical Systems*, Ed.: Hu, F. CRS Press, 2014
- (Li and Meerkow 2008) Li, J., Meerkow, S. M.: *Production Systems Engineering*, Springer Publ., 2008
- (Li 2009) Li, S. Z.: *Markov Random Field Modeling in Image Analysis*. Springer Publ., 2009
- (Little 1961) Little, J. D. C.: A Proof for the Queuing Formula  $L=AW$ . *Operations Research* Vol. 9, Issue 3, pp. 383–387, 1961
- (Lopez Research 2014) Lopez Research: *Building Smarter Manufacturing With The Internet of Things (IoT)*, 2014
- (Mayr 2013) Mayr, M.: Eight reason why insurers should be engaging with the Internet of Things. Bosch Connected World Blog, 2013, [blog.bosch-si.com/categories/internetofthings/2013/08/eight-reasons-why-insurers-should-be-engaging-with-the-internet-of-things/](http://blog.bosch-si.com/categories/internetofthings/2013/08/eight-reasons-why-insurers-should-be-engaging-with-the-internet-of-things/)
- (McCarthy 2004) McCarthy, I. P.: Special Issue Editorial: The What, Why and How of Mass Customization. *Production Planning and Control*, Vol. 25, Issue 4, pp. 347–351, 2004
- (Mirkovic et al. 2005) Mirkovic, J., Dietrich, S., Dittrich, D., Reiher, P.: *Internet Denial of Service: Attack and Defense Mechanisms*. Prentice Hall, 2005
- (Möller 2014) Möller, D. P. F.: *Introduction to Transportation Analysis, Modeling and Simulation – Computational Foundations and Multimodal Applications*, Springer Publ., 2014
- (Moser et al. 2007) Moser, A., Krügel, C., Kirda, E.: Exploring Multiple Execution Paths for Malware Analysis. *IEEE Security and Privacy*, pp. 231–245, 2007
- (Pine 1993) Pine, B. J. II: Making Mass Customization Happen: Strategies for the New Competitive Realities. *Planning Review*, Vol. 21, Issue 5, pp. 23–24, 1993
- (PWC 2015) PWC 2015: *The insurance industry in 2015*. PricewaterhouseCoopers LLG, 2015
- (Rue and Held 2005) Rue, H., Held, L.: *Gaussian Markov Random Fields – Theories and Applications*. Chapman & Hall/CRC Press, 2005
- (Sanchez and Nagi 2001) Sanchez, L. M., Nagi, R.: A review of agile manufacturing systems, In: *International Journal Production Research*, Vol. 39, No. 16, pp. 3561–3600, 2001
- (Schroer et al. 2007) Schroer, B. J., Harris, G. A., Möller, D. P. F.: Simulation to Evaluate Several Critical Factors Effecting Manufacturing, In *Proceed. SCSC 07: Moving Towards the Unified Simulation Approach*, Ed.: G. A. Wainer, H. Vakizadian, pp. 587–592, SCS Publ. San Diego, 2007; DOI: 10.1145/1357910.1358002
- (Selko 2014) Selko A.: Chicago is New Home of Digital Manufacturing and Design Innovation Institute. In: *Industry Week's Expansion Management*, Feb. 26th 2014
- (Sharif et al. 2008) Sharif, M. I., Lee, W., Cui, W., Lanzi, A.: Impeding Malware Analysis using Conditional Code Obfuscation. In: *NDSS*, 2008
- (Steinfeld 2004) Steinfeld, E. S.: China's Shallow Integration: Networked Production and the New Challenges for Late Integration. In: *World Development*, Vol 32, No. 11, pp. 1971–1987, 2004
- (Stephan et al. 2013) Stephan, P., Eich, M., Neidig, J., Rosjat, M., Hengst, R.: Applying Digital Product Memories in Industrial Production. In: *SemProM*, pp. 283–304, Ed.: Wahlster, W., Springer Publ. 2013
- (Suri 1998) Suri, R.: *Quick Response Manufacturing – A Companywide Approach to Reducing Lead Times*. Productivity Press, 1998
- (Ten et al. 2011) Ten, C., Hong, J., Liu, C.: Anomaly Detection for Cybersecurity of the Substations. *IEEE Transact. Smart Grid* Vol. 2(4), pp. 865–873, 2011
- (Terwiesch and Ganz 2009) Terwiesch, P., Ganz, C.: Trends in Automation. In: *Handbook of Automation*, pp. 127–143. Ed.: Nof, S. S., Springer Publ., 2009

(Tseng and Jiao 2001) Tseng, M. M., Jiao, J.: Mass Customization, Chapter 25, pp. 684–709. In: Handbook of Industrial Engineering, Technology and Operation Management. (3rd ed.). Ed.: Salvendy, G. John Wiley Publ. 2001

(Veugelers and Sapir 2013) Veugelers, R., Sapir, A.: Policies for manufacturing EU growth. Chapter 7, pp. 161–168. In: Manufacturing Europe's Future, Ed. Veugelers, R., Breugel Blueprint Series, 2013

(Westerman et al. 2014) Westerman, G., Bonnet, D., McAfee, A.: Leading Digital, Harvard Business Review Press, 2014

(Willems et al. 2007) Willems, C., Holz, T., Freiling, F. C.: Toward Automated Dynamic Malware Analyses using CW Sandbox. IEEE Security and Privacy, Vol. 5, pp. 32–39, 2007

(Yang and Burns 2003) Yang, B., Burns, N.: Implications of postponement for the supply chain. International Journal of Production Research, Vol. 49, Issue 9, pp. 2075–2090, 2003

(Zühlke 2008) Zühlke, D.: SmartFactory – A Vision becomes Reality. In: Proceedings of the 17th World Congress IFAC'08, pp. 14101–14108, 2008

链接

(http1 2015) [http://www.its-owl.de/fileadmin/PDF/News/2014-01-14-InIndustrie\\_4.0-Smart\\_Manufacturing\\_for\\_the\\_Future\\_German\\_Trade\\_Invest.pdf](http://www.its-owl.de/fileadmin/PDF/News/2014-01-14-InIndustrie_4.0-Smart_Manufacturing_for_the_Future_German_Trade_Invest.pdf)

(http2 2015) <http://www.leanproduction.com/agile-manufacturing.html>

(http3 2015) <http://www.fortiss.org/en/research/projects/opak/>

(http4 2015) <http://www.autonomik40.de/>

(http5 2015) <http://www.vdma.org/video-item-display/-/videodetail/2996989>

(http6 2015) <http://xmpp.org/extensions/xep-0191.html>

(http7 2015) <http://whatis.techtarget.com/definition/cybersecurity>

(http8 2015) [https://en.wikipedia.org/wiki/ISO/IEC\\_27001:2013](https://en.wikipedia.org/wiki/ISO/IEC_27001:2013)

(http9 2015) [http://www.iso.org/iso/catalogue\\_detail.htm?csnumber=34731](http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=34731)

(http10 2015) [https://files.sans.org/summit/scada08/Stan\\_Johnson\\_NERC\\_Cyber\\_Security\\_Standards.pdf](https://files.sans.org/summit/scada08/Stan_Johnson_NERC_Cyber_Security_Standards.pdf)

(http11 2015) <https://www.isa.org/intech/201406standards/>

(http12 2015) <http://www.plattform40.de/I40/Navigation/DE/Plattform/Aktivitaeten/aktivitaeten.html;jsessionid=2C7F7C0B9B5CA36127F25F1F469A9FFE>

(http13 2015) <http://www.mittelstand-digital.de/DE/Foerderinitiativen/mittelstand-4.0.html>

(http14 2015) <http://www.mittelstand-digital.de/DE/mittelstand-digital,did=726302.html>

(http15 2015) [www.pzh-hannover.de/pzh-publikationen.html](http://www.pzh-hannover.de/pzh-publikationen.html)

373

376

## 未来社会生活中的影响

本章简要介绍了信息物理系统对未来社会工作生活的影响。8.1节介绍了从历史的需求到现在全球数字化环境下的生产技术变迁。8.2节涉及数字化和自动化制造过程要求对未来工作的经济、社会和组织挑战。8.3节重点讨论了工作领域中不断变化的需求，并试图回答数字制造/工业4.0所带来的问题。8.4节介绍了产品更加个性化的方面以及数字制造在全球范围内的影响。8.5节包含关于未来对工作生活的社会影响的综合问题，最后包括进一步阅读的参考文献和建议。

### 8.1 简介

当今全球数字化工作环境越来越多地以模仿人类活动和技能的电脑为特征，这让人类工作者开始怀疑他们最终是否会被解除职务或被取代。在涉及诸如感官知觉、模式识别和陈述性知识等技能时尤其如此。尽管这些细微之处都是无形的、不可预知的，但在软件程序的许多代码行中，它们可以简化为语句序列。一个软件程序本质上由一系列特定的编程指令组成，这些指令决定了计算机硬件该如何操作，而计算机硬件的处理能力依赖于已声明的相关知识，并且各个应用程序的相关功能可以划分为明确的处理步骤。人类评估情况和作出决定的能力主要来自隐性知识的模糊部分。这也是人类最具创造力和艺术能力的地方。

377

关于数字制造/工业4.0过程中自动化的进程，作为第四次工业革命的一部分，一些作者认为这是一种“改革”，同时，工作场所的数字化也带来了更多的挑战，包括新的工作方式和模式。此外，考虑到前面提到的通过全面自动化和部分或全部自动化管理的机器来获得人类活动和技能，因为这些机器可以经济高效地运行，所以必须考虑对工人的影响。

在这方面，需要确定和解决全球数字化工作环境的社会挑战及其对员工工作生活的影响，因为社会将继续致力于实现自主的人类活动，并且在全球数字时代为人类就业的承诺而努力。原因在于，新技术将人类从他们的束缚中释放出来。正如参考文献（Westerman et al. 2014）所报道的那样，员工可以越来越多地在他们想要的时间和想要的地方工作。他们可以随心所欲地与几个朋友或数百个朋友交流，与他们的组织内外的其他人分享敏感信息。对许多员工来说，这听起来像是自由。对许多经理人来说，这听起来像是混乱。因此，在全球数字化工作环境下，公开交流的机会和风险成为一个重要的问题，因为专业人士是经济增长、创新和繁荣的重要组成部分。从此以后，工作资格申请人和员工必须会面，工作将涉及适应数字化要求的更短的开发周期，因为技能比赛不会很快减慢。具有正确的数字技能是数字化转型的竞争优势和关键推动力。因此，如参考文献（Westerman et al. 2014）所报道的那样，更快地建立这些技能的公司将会更快地前进。

为了在数字制造/工业4.0中赢得数字技术竞赛，生产过程的转变必须在充分适应的自动化制造系统下进行。这涉及使用数字模型、制造计划和控制的方法，将它们与实际的制造子系统、制造组件（硬件）和工具（软件）联系起来。其核心功能是通过信息物理系统（CPS）将虚拟世界（信息）与制造组件世界（物理）联系起来。信息物理系统可以作为一个强大的数字平台，具有良好的结构和良好的集成，并且只有在指定的制造过程中存在必要的复杂程

度。因此,基于GPS的制造过程在很大程度上能够根据外部要求独立和自主地进行控制和优化,通过安装实现对杰出的自动化水平的超越。

[378]

在考虑引入半自动化或完全自动化的基于GPS的制造流程时,涉及广泛的工业过程创新和劳动条件。这对社会学和劳动政策具有重要意义。如果广泛实施这种半自动和完全自主的系统,现有的数字制造/工业4.0可持续发展的工作格局将会发生变化。不仅公司内部的变化过程会受到影响,而且还会影响公司间的进程,因为这种结构可以改变整个供应链或价值链。这适用于数字制造/工业4.0综合解决方案中的所有直接和间接增值活动。它是指制造人员的业务和执行层面;战略层面的规划、管理和控制;数字制造综合解决方案的中下层管理;以及技术专家,特别是系统和软件工程师(Hirsch-Kreinsen 2014)。最后,这意味着,除了公司资金和人力资源,还需要强大的数字治理,因为数字能力的新需求和数字技术驱动活动带来的新风险使数字治理变得至关重要。治理可以比以前更快地实现新的解决方案,同时还可以管理安全性、法规遵从性和遗留系统集成的挑战。它帮助企业获得更全面的运营观点和更有效的合作,并使政策更好地发挥作用(Westerman et al. 2014)。

然而,在第一次和第二次工业革命期间,公司的治理主要集中在员工和机器上,以使将两者结合到一个严格控制的完美制造单元中。作为第三次工业革命技术进步的一部分,新机器复杂性的增加减少了雇员们监视和操作机器的活动。与此同时,新机器的嵌入式计算系统具有双重角色,一方面用于监控和过程控制,另一方面接管以前由员工执行的各种活动。这是通过应用程序专门的软件程序实现的,自动化制造过程变得越来越标准化,以避免出现偏差。因此,计算机已经被集成到数字制造/工业4.0过程中,作为一个可使用的、功能强大的工具。“计算机”这个术语也包括了特定应用的软件程序,没有它计算机就不能执行数字制造/工业4.0集成解决方案所要求的应用程序。

[379]

从上述可以看出,计算机现在已经获得了隐性知识,这意味着它们可以像人类一样思考。但事实并非如此,尽管人工智能软件算法已经变得更加复杂。“人工智能”这个词恰当地表达了人工智能,而不是人类的智慧。在集成的数字制造工业中制定任务的情况下,计算机可以达到与人类相同的目标,但不能使用人类的手段。当传感器向计算机报告组装的工件不完整时,它不依赖于直觉或对应的技能;相反,它遵循相应的软件程序。此外,制造业的基本战略在根本上是不同的,而同样的结果却可以实现。但是,计算机更快地执行软件程序指定的指令。

## 8.2 经济、社会和组织方面的挑战

分析新数字技术对人员和组织变化的影响,需要了解整个生产系统及其相互依赖关系。分析新数字技术对制造自动化的影响,需要对数字技术和员工活动的相互作用进行广泛的技术和社会学研究。

看看当今制造流程中数字技术的可能和想象的转换趋势将决定所需的数字自动化系统的类型,与以前的制造组织形式相比,这些领先的数字技术的扩散,特别是目前已知的工作组织模式和人员的部署将永久改变人们的工作和生活。这种情况可以用社会技术系统方法来研究,这种方法是一种复杂的有组织的工作设计方法,它可以识别出在工作场所中人类和技术之间的相互作用(hupl 2015)。在参考文献(Geels 2004)中,将社会技术系统描述为包括制造、扩散和技术的使用,从更实用的意义上讲,是社会功能所必需的要素之间的联系。由于技术是现代社会功能的关键要素,将技术的制造、分配和使用区分为子功能是有意义的。为了满足这些子功能,我们将必要的要素描述为资源。因此,社会技术系统包括人工制品、知识、资本、劳动力、文化意义等。

遵循社会技术系统方法，我们可以精确地确定在半自动化或完全自动化的制造系统（Hirsch-Kreinsen 2014）中引领改变的数字工作的相关维度。

- 即时的人机交互和直接相关的技能要求；
- 直接受雇于系统的员工的任务结构和活动；
- 工作被组织为不同的劳动分工以及水平分层的任务和活动，需要系统和员工之间的合作和沟通设计。

这些维度是来自不同学科的最初的研究。最重要的发现是将重点放在当前系统的操作层面上，而父级管理系统规划和系统管理则处于边缘。

从数字制造业/工业 4.0 在人类技术和环境相互作用的转变中可以看到，在虚拟工厂和移动工作环境中不需要在生产现场的新形式的协同工作是一个重要的部分。具有多模式、易于使用的用户界面的智能辅助系统为数字制造/工业 4.0 提供支持。但是，不仅是新的技术、经济和法律方面决定了未来的竞争力。新的社会工作基础设施可以确保优秀的员工参与构建创新流程。重要的角色将是人机交互和人与环境的相互作用。具有易于使用、多通道用户界面的智能辅助系统支持员工的工作。这些变动成功的关键在于增加综合素质和培训以及工作模式的组织和设计。这些模式应该将高度自治的自主权与去中心化的管理和控制形式结合起来。

[380]

员工积极应对的成功改变的关键，除了全面的资格培训和进一步的培训措施外，还需要工作的组织和设计模式。他们应该是把高度的自治与去中心化的管理和控制形式（Helbig 2013）结合起来的模式。在这方面，流程责任再次转移到生产线上具有实际价值的地方。

因此，最终的目标是分割功能和职责，以便最优地利用计算机的速度，目标还包括员工在流程中充分、主动和直观的参与。在这个模式中，员工是工作模型的一部分，不再排除在外。这导致了数字制造/工业 4.0 的技术和人类全面融合的观点，这使对活动的分配和主体的自主程度成为可行（Hirsch – Kreinsen 2014, Rammert 2003）。

正如工业 4.0 工作组的题为“未来项目工业 4.0 实施建议”（德文）的最新报告所述，不仅新技术、经济和法律方面决定了未来的竞争力，而且工业 4.0 新的社会基础设施工作可以确保员工在创新过程中的结构性参与更加积极。

除了全面的资格认证和培训之外，员工积极应对的成功改变的关键是工作模式的组织和设计。员工应要求进行更广泛的决策和参与，以确定负载调节的范围和可能性。基于对人力劳动在创新过程中的重要性的广泛认识，这一社会技术方法将对未来的工业 4.0 需要创新的地方开放（Kagermann et al. 2013）。

### 8.3 在工作中改变需求

如今，人们普遍认为，技术创新是进步的可靠基础。因此，新的数字技术成为一个理想的目标。考虑到数字制造/工业 4.0 的模式，显而易见的是，复杂的自动化制造系统中的劳动力分配是针对计算机和面向应用的软件程序以及因特网的能力量身定制的。CPS 平台提高了生产率，降低了劳动力成本，避免了人为错误。在这方面，数字制造/工业 4.0 将尽可能多的控制活动转移到软件上。因此，软件越强大，它的能力就越强。对于人工操作人员来说，唯一的责任是那些不能由开发人员设计为自动完成的任务，比如对异常的控制或者电源故障助手。迄今为止描述的方法称为以智能传感器实现的以技术为中心的自动化。这些传感器不仅可以观察过程和环境，还可以对所测量的数据在网络制造集成解决方案方法中进行处理，并将所获得的结果传回自动化的制造系统中。这可以监控和控制复杂的自动化制造系统，这些系统可以作为特定区域的预警系统。例如再生能源系统中风力涡轮机的智能振动感应，如果风力塔的振动达到

[381]

危险的高振幅，它就会关闭系统。

无线传感器网络的使用有可能提高数字制造/工业 4.0 的效率。无线传感器网络是空间分布的自主传感器，用于监控物理或环境条件，并将其数据通过网络传递到主要位置（见第 4 章）。由大量传感器节点组成的传感器网络分配在被测制造过程或者非常接近的制造过程中，能够执行一些处理，收集感觉信息，以及与网络中的其他连接节点进行通信。它们属于发展最快的技术，有可能极大地影响人类的工作生活。传感器节点本身是较大的传感器网络的组件。网络中的每个传感器节点负责收集周围环境的数据，并将数据发送到网络中的处理器。传感器节点在生产过程中执行许多活动。

无线传感器广泛应用于大量的新应用领域，并通过技术的融合使其变得可行：

- 数据处理（包括硬件、软件、中间件、算法）；
- 微机电系统（MEMS）技术（见第 5 章）；
- 无线通信。

无线传感器网络可以：

- 协作监视感兴趣的区域；
- 执行任务；
- 通过网关与其他节点交互。

无线传感器已经具备了以下能力：

- 低成本；
- 低功率；
- 多功能传感器节点。

[382]

这些是小尺寸、在短距离内独立通信的设备，并基于大量节点（Akyildiz et al. 2002）的合作努力实现了传感器网络的想法。

无线传感器网络需要相关的解决方案。

- 路由：如何将信息从一个节点路由到另一个节点，如何发送到网关，以及如何有效地安排每个节点的能源效率和性能。
- 集群：节点可以很容易地相互通信。考虑到能源作为一个优化参数，聚类是必需的。
- 自组织：这些协同的、动态的和分布式的设备将具有在其中分配任务以实现有效计算的能力。
- 节省能源：如何从环境中获得能量。
- 任务定义：如何将传感器运行的任务作为传感器节点上的一种设备的任务。

IEEE 802.11 等无线网络标准已经流行起来，为用户提供了访问信息的灵活性和移动性（http2 2015）。该标准的划分如下所示。

- IEEE 802.11™—2012：IEEE IT 标准；系统之间的电信和信息交换；本地和城域网络的具体要求；第 11 部分：无线 LAN 中访问控制（MAC）和物理层（PHY）
- IEEE 802.11aa™—2012：IEEE IT 标准；系统之间的电信和信息交换，本地和城域网络的特殊要求；第 11 部分：无线局域网中访问控制（MAC）和物理层（PHY）规范 修订 2：强大的音视频流的 MAC 增强功能。
- IEEE 802.11ae™—2012：IEEE IT 标准；系统之间的电信和信息交换；本地和城域网络的特殊要求；第 11 部分：无线局域网中访问控制（MAC）和物理层（PHY）规范 修订 1：管理框架的优先级。

目前，为制造计划和管理收集制造业数据主要是通过有线传感器实现的。现有传感系统的

设备和维护费用以及耗时的安装阻碍了实时数据业务的大规模监控和控制。具有集成传感、计算和无线通信能力的小型无线传感器在数字制造/一体化工业的低成本和易于安装方面提供了巨大的优势，包括传感器技术、能源有效的网络协议，以及用于数字化自动化制造过程的传感器网络的应用。因此，数字制造/工业 4.0 中的人工参与者越来越被挤出行动、反馈和决策的循环。由于这些操作人员在数字制造/一体化工业系统的运作中被忽略——他们只是在做辅助功能，他们的技能和能力以及隐性/显性的知识都被忽视。

383

在这方面，德国的研究联盟指出，如果德国在第四次工业革命中成功地掌握了互联网的驱动力，并且开发和运行自主的、自我控制的、基于知识和基于传感器的制造工序（http3 2015），那么德国才能获得制造领域的成功。

与自动化系统相关的许多问题是基于人机交互的原理，但忽视了人机交互的发展结果。因此，事实上，只有一些自动化的预期效益能实现，主要是与提高运行精度和经济性有关的一些功能，即在系统运行方面，员工和机器之间不会涉及很多交互。观察到的意想不到的自动化困难的另一个原因是最初将焦点放在数字技术影响的定量方面。预期的收益包括减少工作量，降低运营成本，提高精度，减少错误。预期的问题包括需要更多的培训，过少成熟的试点，过于依赖自动化，以及报告过多的信息，正如参考文献（Sarter et al. 1997）所述的那样。

如果系统和软件工程师把工作流程在他们的操作人员的操作中隐藏起来，并且使每个系统都成为一个不可窥探的黑盒子，那么就会进一步加剧这个问题。这种观点背后的想法是，通过让员工在黑箱操作，避免复杂的混淆情况，从而减轻他们的个人责任，从而避免犯错。然而，现在出现这种错误的可能性更高，因为一个不知情操作人员是一个危险的操作人员（Carr 2014）。

因此，认知科学的专家要求系统和软件工程师放弃以技术为中心的方法，并建议他们采用以人为本的自动化处理。在以人为本的自动化中，推荐的设计结构不是从对机器功能的评估开始，而是仔细评估将会操作机器并与之交互的员工的优势和局限性。这将技术发展逆转回到以人为本的原则。其目的是分散功能和责任，使它们不仅能最优地使用计算机的速度和精确性，还能让员工保持活跃和警觉。因此，人类被包括在内，而不是被排除在外（Billings 2000；Carr 2014）（见 8.2 节）。

在参考文献（Carr 2014）中一些有趣的案例报告，飞行员在飞行中使用自动驾驶仪而不是手动驾驶时，在系统没有立刻活跃时可能会发生故障。2013 年 1 月 4 日，美国联邦航空管理局（FAA）发布了一条关于操作员安全警告的单边信息（SAFO）。该文件表明，航空公司承诺尽可能地促使他们的飞行员手动飞行。美国联邦航空管理局决定，根据飞机失事后的研究报告、事故报告和驾驶舱内的研究报告，飞行员已经高度依赖飞机上的自动驾驶仪和其他计算机系统。根据美国联邦航空局的说法，过度使用自动驾驶仪可能会导致飞行员驾驶飞机迅速离开不良状态的能力下降。该警告的结论是，航空公司向飞行员发出指令，要求飞行员减少自动驾驶并采用手动驾驶的操作指令（Carr 2014；SAFO 13002 2013）。

384

### 8.4 产品个性化和全球影响力的变化因素

第四次工业革命（数字制造/工业 4.0）——不是因为技术创新而发生的革命——是由物联网发起的（见第 4 章），它通过提高效率提供了竞争优势。然而正如前面所描述的那样，数字制造/工业 4.0 也带来了经济、社会和组织方面的挑战，在这方面，工作领域的需求不断变化，产品的个性化和全球影响力的变化因素都在发挥着重要的作用。

未来的制造业面临着主要的挑战，在 Spath 等人（2013）的报告中详细描述了这一问题，



即竞争优势来自于市场上定制产品的更快和更可靠的能力，因为这是全球竞争所需要的。对于制造业来说，这意味着：

- 在小系列产品中制造各种定制产品，甚至是单个部件的可靠制造；
- 成功地处理控制过程和供应材料所需的产品的复杂性；
- 尽管市场波动和销售预测不可靠，但确保交货时间短。

在私人 and 公共部门广泛使用计算机、互联网和移动电话将会带来新的工作方式。到目前为止，这些新技术还没有渗透到制造业的各个领域。一个引人注目的例子是在制造业中使用智能手机和平板电脑。移动设备的生产和使用是否仍然受限于物流、维护和维修中的几个应用程序？人们认为这些新技术可以在直接制造过程中使用（Spath et al. 2013）。这样做的一个原因是，今天制造业的交付可靠性最多可以通过高水平的人工以灵活的短期控制能力来努力实现。

[385]

因此，从数字制造/工业 4.0 模式来看，更期待在工业制造中实现从中央控制到灵活、去中心化协调的工序的转变。在这种情况下，拥有联网功能的 CPS 是一个平台，用于监控流程、确保透明并提供智能代理以确保自动化生产流程。这也将对制造业员工的灵活性产生强烈的影响，因为他们将实时自动部署，大部分时间都是闲置时间。

用户将物件、控件和传感器与物联网（数据和服务）联在一起，代表万物互联网，将为制造流程实时提供新的信息水平。数据模型是最新的，整个制造活动更加透明。了解制造过程的真实情况将非常重要。如今我们正这样执行，如果某些制造过程是模糊的，我们会想办法确切地将工序规划在十分之一分钟的精度内。面对这个困难，今天我们正处于制造规划的订单处理阶段（Spath et al. 2013）。

在制造过程中，基于信息技术的方法试图提高制造事件的透明度，在这些事件中，信息被收集并存储在分散的系统中，可通过互联网协议获得。数字制造/工业 4.0 模式转变的愿景是使机器能够通过互联网技术向不同的用户群——维护人员、机器所有者、机器制造商等——进行广播。如今，这些都是独立的解决方案，必须进行艰苦的维护。从现在开始，制造业的分散规划方法是很重要的，正如物流教授 Michael ten Hompel 所言：“在互联网和电子商务的意义上，波动幅度的增长是强劲的。”我们对未来物流的预测往往比天气预报更糟糕。我们需要创建基于预先构想的边界可转换的系统。核心问题是：一个系统如何看起来像一个你不能计划的系统？答案是由互联网本身提供的。它遵循着这样的格言：“在有限的时间内做出明智的决定，最好是在最晚的时候做出最明智的决定。”例如，一个可能的未来是，在我们的系统管理中应用和实现群体智能（Spath et al. 2013）。

同样不可低估的是，在制造业中分散规划的优势在于能够解决行政层面的问题。即将制造业厂商的主人和员工纳入规划。一方面，他们把自己的经验和知识带到计划中；另一方面，必须认为他们是制造计划中的积极参与者。这很重要，因为响应时间短，与严格的客户需求相一致，只有在规划和控制中包含足够的人力资源才能实现。对于产品个性化来说，自动化在越来越小的系列中平价生产是可能的，这意味着员工的工作仍然是制造过程的重要组成部分。在 Spath 等人（2013）的研究报告中，关于制造业工作的八个主要陈述中已经详细描述了这一点。

[386]

（1）灵活性仍是德国未来制造业工作的关键因素，也是现在短期内的关键因素

（2）灵活性必须在未来成为目标，并且有系统地组织起来——打折扣的灵活性已经不够了。

（3）工业 4.0 不仅仅是信息物理系统的网络。未来包括对象和员工的智能数据获取、存储和分发。

(4) 分散的控制机制，比如完全自治的、自我控制的对象，已经存在而并不是在可预见的未来。

(5) 智能制造设计中必须考虑到安全方面（安全和保障）。

(6) 传统的制造任务正在将制造和员工的知识结合在一起持续发展

(7) 制造业和知识型员工的工作继续在一起成长。

(8) 员工必须在短期内得到任职资格，以减少工作中可预见的工作活动

正如工业 4.0 的最终报告所述“实施战略举措工业 4.0 的建议——工作组工业 4.0 的最终报告”，我们必须意识到，工业 4.0 将解决一些当今世界面临的挑战，例如资源和能源效率、城市生产和人口变化。工业 4.0 能够在整个价值网络中实现持续的资源生产力和效率提升。它允许以一种将人口变化和社会因素考虑在内的方式组织工作。智能地帮助系统使员工不必执行常规任务，使他们能够专注于创造性的增值活动。鉴于熟练员工短缺的情况，这将使老员工能够延长工作时间。灵活的工作组织将使员工能够更有效地结合自己的工作、私人生活和持续的职业发展，促进更好的工作与生活的平衡（Kagermann et al. 2013）。因此，制造业数字化转型的实现，不仅体现在制造过程的自动化，而且在员工的技能上。他们的经验必须在高质量条件下得到可持续的保护。但从更广泛的角度来看，年轻和年长的雇员之间存在差异。年轻的员工更加熟悉数字化转型。有时称他们为数字原住民。他们更关心在创新的环境中工作，并获得全新的职业生涯和机会。年长员工有时需要帮助，以克服数字化和连接性的担忧，因为今天的员工在他们需要的时候会自动得到正确的信息，因为他们在数字制造/工业中工作得很好，在不久的将来，机器、产品和人类将会相互影响。参观贸易展览会、研究实验室、大学或工业企业的试点工厂，人们可以看到，所有这些都在进行为数字制造/工业 4.0 自动化的未来模式转变的前沿工作，即制造业机器系统操作员将发展为制造机器系统管理人员。因此，在不久的将来，与现在相比，在制造方面将有不同技术的工作。其结果是数字制造/工业 4.0 的数字化和网络化将会改变当今的行业。如果数字化的能力能以更快的速度增长，人类在未来的工作生活中需要适应什么样的节奏？这会存在风险和机遇，但最大的问题是如何组织技术进步

387

8.5 练习

1. 数字制造/工业 4.0 中的术语自动化是什么意思？

2. 描述数字制造/工业 4.0 系统中的自动化结构

3. 工业 4.0 是什么意思？

4. 描述工业 4.0 的工作。

5. 数字化和全球化工作环境的含义是什么？

6. 描述数字化和全球化工作环境的影响

7. 数字治理一词的意思是什么？

8. 举一个数字治理的例子。

9. 术语软件程序是什么意思？

10. 描述软件程序的结构。

11. 工作生活中的社会挑战这个词是什么意思？

12. 描述工作生活中社会挑战的影响。

13. 数字制造中的组织挑战这个术语是什么意思？

14. 举例说明数字制造中的组织挑战

15. 术语社会技术系统概念是什么意思？
16. 描述社会技术系统概念的结构

17. 工作领域中不断变化的需求是什么意思？

18. 描述工作世界中不断变化的需求的影响。

19. 术语无线传感器是什么意思？

20. 举一个无线传感器的例子。

21. 术语无线传感器网络是什么意思？

22. 描述无线传感器网络的结构。

23. 术语传感器节点是什么意思？

24. 举一个传感器节点的例子。

25. 术语更大的生产个性化意味着什么？

26. 描述更大的生产个性化的影响

27. 制造控制工作一词是什么意思？

28. 举一个制造控制工作的例子

29. 制造业分散式规划一词是什么意思？

30. 描述制造业分散式规划的影响

388

## 参考文献

- (Akyildiz et al. 2002) Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., Cayiric, E.: Wireless Sensor Networks: A Survey. *Computer Networks* Vol. 38, pp. 393–422, 2002
- (Billings 2000) Billings, C. J.: Aviation Automation: The Search for a Human Centered Approach. In: *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 30, Issue 3, pp. 286–297, 2000
- (Carr 2014) Carr, N.: *The Glass Cage, Automation and Us*. W. W. Norton Publ., 2014
- (Geels 2004) Geels, F. W.: From sectoral systems of innovation to socio-technical systems insights about dynamics and change from sociology and institutional theory. In: *Research Policy*, Vol. 33, pp. 897–920, 2004
- (Helbig 2013) Helbig, J.: The Vision: industry 4.0 as part of a networked, intelligent world. In: *Implementing recommendations for the future project industry 4.0 Final Report of the Working Group Industry 4.0, Chapter 2*, pp. 22–30, Office of Research Alliance at the Donors' Association for German Science, 2013
- (Hirsch-Kreinsen 2014) Hirsch-Kreinsen, H.: *Wandel von Produktionsarbeit – “Industrie 4.0”* (in German). Faculty of Economic and Social Sciences, University of Dortmund, 2014.
- (Kagermann et al. 2013) Kagermann, H., Wahlster, W., Helbig, J. (Eds.): *Recommendations for implementing the strategic initiative Industry 4.0 – Final Report of the Working Group Industry 4.0*. Office of the Industry-Science Research Alliance Secretariat of the Platform Industrie 4.0, 2013
- (Rammert 2003) Rammert, W.: *Technik in Aktion: Verteiltes Handeln in soziotechnischen Konstellationen* (in German). In: *Autonome Maschinen*, pp. 289–315, Eds.: Christaller, T., Wehner, J., Westdeutscher Verlag, Wiesbaden, 2003
- (Sarter et al. 1997) Sarter, N.B., Woods, D. D., Billings, C. E.: *Automation Surprises*. In: *Handbook of Human Factors and Ergonomics*, Ed. Salvendy, G., Wiley Publ. 1997
- (SAFO 13002 2013) Federal Aviation Administration, SADO 13002, January 4th 2013, [faa.gov/other\\_visit/aviation\\_industry/airline\\_operators/airline\\_safety/safo/all\\_safo/media/2013/SAFO13002.pdf](http://faa.gov/other_visit/aviation_industry/airline_operators/airline_safety/safo/all_safo/media/2013/SAFO13002.pdf)
- (Spath et al. 2013) Spath, D., Ganschar, O., Gerlach, S., Hämmerle, M., Krause, T., Schlund, S.: *Produktionsarbeit der Zukunft – Industrie 4.0* (in German). Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO. Fraunhofer Verlag, 2013
- (Westerman et al. 2014) Westerman, G., Bonnet, D., McAfee, A.: *Leading Digital – Turning Technology into Business Transformation*. Harvard Business Review Press, 2014

## 链接

- (http1 2015) [https://en.wikipedia.org/wiki/Sociotechnical\\_system](https://en.wikipedia.org/wiki/Sociotechnical_system)
- (http2 2015) <http://standards.ieee.org/about/get/802/802.11.html>
- (http3 2015) <http://www.forschungsunion.de/veroeffentlichungen/>

# 术 语 表

## A

**AADL** 架构分析和设计语言是一种建模语言，通过可扩展的表示法，支持对系统架构的早期和重复分析。此外，它是一个具有精确定义语义的工具框架。

**ACATECH** 德国国家科学院是德国科学家和技术界的代表。作为一个工学院，ACATECH 通过提供合格的技术评估和前瞻性的建议来支持政策制定者和社会。

**AC/DC** 交流电（AC）是电荷周期性反向变化的电流，而直流电（DC）是电荷在一个方向上的电流。

**ACM** 计算机协会，世界上最大的教育和科学计算学会。它提供计算领域首屈一指的数字图书馆，并为其成员和计算行业提供先进的出版物、会议和职业资源。

**ADC** 模拟信号 - 数字信号转换器，将连续物理量转换为用数字信号表示物理振幅的装置。

**ADL** 架构开发语言，用于多个学科，例如系统工程、软件工程、企业建模和工程。

**ALU** 算术逻辑单元，一个执行算术和按位逻辑运算的数字电子电路。

**ANSI** 美国国家标准协会，是提供关于国家、地区和国际标准的及时的、可行的信息的主要来源。

**ARPIP** 地址解析协议，用于 IPV4 互联网协议，将 IP 网络地址映射到数据链路协议使用的硬件地址的过程。

**ARPANET** 高级项目研究代理网络，这个网络成为了互联网的基础。

**ASIC** 应用型集成电路，一种专为特殊应用而设计的微芯片。

**ASP** 特定应用程序处理器，一个在系统 - 芯片设计中使用的组件。

**AUP** 敏捷统一工序，一个统一开发工序的简化版本。

## B

**BITKOM** 联邦信息技术、电信和新媒体协会，德国信息和电信行业协会。

**BMBF** 德国联邦教育和研究部。

**BMWi** 德国联邦经济与能源部。

**BPEL** 业务流程执行语言是一种标准的可执行语言，用于指定带有 Web 服务的业务流程的操作。

**BPL** 宽带电力线，允许在公共配电线路中相对高速的数字数据传输的方法。

**B2B** 企业对企业指的是公司之间的业务，而不是公司和个人客户之间的业务。

**B2C** 企业对客户是指直接在公司和作为产品和服务的最终用户的客户之间的业务。

**B2MML** 面向企业的制造标记语言是 ANSI/isa - 95 系列标准的 XML，它由一组 XML 模式组成。

## C

**CAD** 计算机辅助设计，使用计算机系统来协助设计。

**CAE** 计算机辅助工程，使用计算机软件来辅助工程分析任务。

**CAN** 控制器局域网，一种用于允许微控制器和设备相互通信的传输总线标准。

**CEPCA** 消费电子电力线通信联盟，一个非营利的工业组织，其任务是确保在智能家居中使用的高速电力线通信系统之间的共存。

**CIP** 关键的基础设施保护，这是一个概念，涉及对集中地区的关键基础设施的严重事故的准备和应对。

**CISC** 复杂指令集计算指的是为计算机设计的计算机指令集合，其中单个指令可以执行多个低级操作。

**CLB** 可配置逻辑块，一种基于可编程门阵列技术的基本块。

**ConOps** 操作的概念,从系统用户的个人角度描述系统的特征。

**CO<sub>2</sub>** 二氧化碳,是通过人类活动排放的主要的温室气体。

**COTS** 商业现货,描述现成的可供出售的硬件或软件产品的形容词。

**CPD** 持续的职业发展,使人们在职业生活中保持他们的知识和技能。

**CPES** 信息物理能量系统,能源网格中组件的信息和物理组合。

**CPLD** 复杂可编程逻辑器件,完全可编程的与/或阵列和一组宏单元的组合。

**CPMS** 信息物理制造系统,一个协调控制物理实体的生产计算单元的系统。

**CPPS** 信息物理生产系统,通过集成传感器和测量系统实时收集数据,存储并分析它们以进行建模。它们可以理解为数字通信设备,并与物联网和服务联网。

**CPS** 信息物理系统,计算、网络和物理过程的集成。

**CPSEF** 信息物理系统工程框架,用于高效 CPS 的开发和运行。

**CPU** 中央处理单元,包含执行计算机程序指令的逻辑电路的计算机中的核心单元。

**CS** 计算机学会,一个计算机专业的组织。

**CSCI** 计算机软件配置项目是指满足最终用户功能,为其单独配置管理所设计的软件集合。

**CTC** 对客户至关重要的是对客户需求侧面分析的质量功能开发活动的输入。

**CTQ** 质量关键在于与客户的需求相关的内部关键参数。

**CUDA NVIDIA CUDA** 并行计算平台。

## D

**DAC** 数字信号-模拟信号转换器,将数字信号转换为连续物理量的设备。

**DARPA** 国防高级研究计划署,美国国防部(DoD)的一个部门,资助技术开发,支持国家安全。

**DC/AC** 直流电(DC)是仅在一个方向上的电荷的电流,而交流电(AC)是电荷周期性地反转方向的电流。

**DCS** 分布式控制系统,通过机器分配的自动化控制系统,为机器的不同部分提供指令。

**DHS** 数字家庭标准是通过电力线(PLC)进行家庭联网的通用电力线协会(UPA)的标准。

**DICT** 分布式信息和通信技术。

**DIP** 双列直插式,是中小型集成电路最常见的封装类型。

**DLL** 动态链接库,一个包含可用于另一个模块的函数和数据的模块。

**DMAIC** 定义、测量、分析、改进、控制、一种数据驱动的质量策略,用于改进过程和六西格玛计划的组成部分。

**DMDI** 数字制造与设计创新研究所是美国一家应用尖端技术的研究机构,以减少制造过程中的时间和成本,加强供应链的能力,并降低采购成本。

**DoD** 美国国防部。

**DPM** 数字产品存储器,在产品生命周期中存储数据。

**DRIA** 数字维修和维护助理。

**DSDM** 动态系统开发方法,一个敏捷的项目交付框架,主要用作软件开发方法。

**DSP** 数字信号处理器,针对数字信号处理的操作需求进行了优化的专用处理器架构。

## E

**ECG** 心电图,用于监测心脏。

**ECPC** 扩展-聚类-投影-收缩

**ECS** 嵌入式计算系统,专用系统,计算机被它所控制的设备完全封装。

**EEPROM** 电可擦除可编程只读存储器,一种可擦除和重新编程的用户可修改的只读存储器(ROM)

**eFFBD** 增强的功能流程框图表示系统相互作用的行为项或数据。

**EIA** 电子工业联盟,美国贸易组织联盟,它对从事电子产品制造的公司的利益进行游说。

**EMC** 电磁兼容性意味着设备与其电磁环境兼容。

**EMF** 电磁力,基于带电或磁极化的粒子或物体的电磁相互作用。

**EMR** 电子医疗记录包含了一个供应商的标准医药和临床数据。

**EPC** 电子产品代码,一个通用标识符,为特定的物理对象提供独一无二的身份。

**EPROM** 可擦除可编程只读存储器,可擦除和重复使用的可编程只读存储器。

**ERP** 企业资源计划、业务流程管理软件,允许组织使用集成应用程序系统来管理业务。

**EssUp** 精炼统一过程是软件过程改进的一种方法。

**EU** 欧盟。

## F

**FAA** 联邦航空局,负责民航提升、安全和管理美国机构,以及监督空中交通管制的发展。

**FAN** 织物区域网路,无线通信基础设施,能够在智能服装上实现无处不在的联网和感应。

**FDD** 特性驱动开发是一种集成和增量的软件开发方法。

**FPGA** 现场可编程门阵列,一种基于可编程连接的可配置逻辑块(CLB)连接的半导体器件。

**FPLA** 现场可编程逻辑阵列是一种用于实现组合逻辑电路的可编程逻辑器件。

## G

**GAL** 通用阵列逻辑器件由可再编程的可编程阵列逻辑(PAL)矩阵和可编程输出单元组成。

**GCN** 全球通信网络,是由自主管理的广告代理机构组建的最古老的国际网络之一。

**GDP** 国民生产总值衡量一个国家公民生产的货物和服务的价值,无论其位置如何。

**GDV** 德国保险协会。

**GMRF** 高斯马尔可夫随机变量,简单的多元高斯随机变量,广泛应用于统计模型。

**GPP** 通用处理器,专为通用计算机设计,例如PC、笔记本电脑、工作站等。

**GPS** 全球定位系统,一个卫星导航系统,由一个11 000海里的轨道卫星网络组成。

**GPU** 图形处理单元,用于为计算机屏幕呈现图像、动画和视频的可编程逻辑芯片。

**GSMA** 移动协会特殊小组代表了全球移动运营商的利益。

**GUI** 图形用户界面,一种使用户能够通过使用符号、视觉隐喻和指示设备与计算机通信的计算机程序。

## H

**HACMS** 高保障信息物理军事系统,一个美国国防部高级计划,其范围可以为建立高保障的信息物理系统创造技术,其中将高度的保障

定义为功能正确并且满足适当的安全和保障属性。

**HAL** 硬件阵列逻辑是可编程阵列逻辑。

**HCI** 通过观察用户与计算机交互的方式以及相互作用的设计技术,聚焦于用户和计算机之间的接口。

**HDL** 硬件描述语言,用于建模、描述和测试电子电路。

**HDTV** 高分辨率电视提供比目前基于NTSC标准的电视更好的分辨率。

**HMI** 人机界面以用户和机器之间的接口为基础,以信号和控制工业自动化机器的状态为基础。

**HPC** 高性能计算,使用并行处理可以高效地、可靠地、快速地运行高级应用程序。

**HRTS** 强实时系统,硬件或软件必须在严格的最后期限内运行。

**HWCI** 硬件配置项目是为了IT服务交付而需要进行管理的组件。

## I

**IACS** 工业自动化与控制系统。

**IATA** 国际航空运输协会。

**ICAM** 集成计算机辅助制造,美国空军计划,开发支持制造一体化的工具和流程。

**ICT** 信息和通信技术是指通过电信提供信息访问的技术。

**IDEF0/ICAM** 定义功能建模。

**IEC** 国际电工委员会为所有电气、电子及相关技术制定国际标准。

**IEEE** 电气与电子工程师学会,世界最大的专业协会致力于推动科技创新,为人类的利益作出杰出贡献。

**IETF** 互联网工程任务组的任务是使互联网更好的工作。

**IFP** 基于信息流属性的软件工程验证方法。

**IFW** 德国制造工程与机械工具研究所。

**INCOSE** 国际系统工程理事会。

**I/O** 输入/输出是指信息系统与其外界的通信/交互。

**IOB** 可编程逻辑电路中的输入/输出组件。

**IoE** 万联网扩展了物联网的概念,因为它不仅连接物理设备,而且通过将它们全部连接在网络上,直接连接到所有内容。

**IoT** 物联网,物理对象互联的网络,嵌入了电

子、软件、传感器和网络联接,使这些对象能够收集和交换数据。

**IoTDaS** 物联网数据和服务,扩展了 IoE,专注于数据和复杂的数据分析和数据以及基于数据的复杂服务。

**IP** 互联网协议,协议通过因特网将数据从一台计算机发送到另一台计算机,并且至少有一个 IP 地址,该 IP 地址从因特网上的所有其他计算机中唯一地标识它。

**IPv4** 互联网协议版本 4,IP 协议的第四修订版,是在不同网络上的数据通信中广泛使用的协议。

**IPv6** 互联网协议版本 6,推出替代 IPv4 协议;因为它的扩展能力而称为下一代互联网,而且它通过最近的大规模部署而增长。

**IR** 红外线是不可见的辐射能,波长比可见光长。

**ISA** 国际自动化学会。

**ISCI** 国际自动化学会安全合规研究所,一个非盈利的自动化控制行业协会,管理自动化协会安全标准的一致性认证程序。

**ISF** 信息安全论坛是一个独立的非盈利组织,致力于通过开发最佳实践方法、流程和解决方案来投资、明确和解决信息安全和风险管理中的关键问题。

**ISM** 工业、科学和医疗。

**ISO** 国际标准化组织,一个独立的非政府组织成员机构,以及世界上最大的自发的国际标准的开发机构。

**IT** 信息技术是信息和数据处理以及必要的硬件和软件的通用术语。

## J

**JIRA** 日本工业机器人协会是由日本的公司组建的开发和制造机器人的行业协会。

## L

**LAB** 逻辑阵列块包含用于将信号驱动到其逻辑模块的专用逻辑。

**LCA** 逻辑单元阵列,一组高性能的、高密度的数字集成电路。

**LCD** 液晶显示器是一种通过当施加一定的电平时,光的偏振方向被影响的液晶的显示器。

**LCM** 生命周期管理可实现从概念阶段到结束阶段的卓越产品管理。

**LCP** 生命周期过程,是产品生命周期中生成的所有信息的无缝集成的概念。

**LEAP** 位置、实体和入口工序,它将模型组件嵌入到位置、实体、入口或工序中。

**LED** 发光二极管是当电流通过时发出可见光的半导体器件。

**LIN** 本地互连网络是基于串行通信协议的子总线系统。总线是使用单线进行数据传输的单主线/多从属线的总线。

**L<sup>2</sup>CAP** 逻辑链路控制和应用协议,支持更高级别的协议复用、数据包分割和重新装配,以及传输服务质量信息。

**LMP** 链路管理协议,用于维护控制信道连通性,验证数据链路的物理连接,关联链路属性信息,抑制下行警告,并将定位在多种网络中的链路故障进行保护/恢复。

**LVRG** 人寿保险改革法案。

## M

**MAC** 媒体访问层,构成 OSI 模型的数据链路层的两个子层之一。

**MADP** 移动应用开发平台支持对当前和未来项目的需求。

**MARG** 磁性、角速率、重力,是一种用于集成和校准来自磁力计、陀螺仪和加速度计的信号的系统,以实现磁,角速率和重力传感器系统。

**MC** 微控制器设备是一种紧凑的微型计算机设计模式,用于管理嵌入式系统的运行。

**MDC** 机器数据采集意味着在生产区域自动记录实时生产数据。

**MEMS** 微机电系统,一种将计算机与微型机械设备(例如传感器、阀门和执行器)相结合并嵌入半导体芯片的的技术。

**MES** 制造执行系统,制造中使用的计算机系统。

**MIT** 麻省理工学院。

**MRF** 马尔可夫随机场,一个联合概率分布的图形模型

**MS&A** 建模、仿真和分析,一个针对所有虚拟研究的重要方面的综合的、最先进的、技术匹配的处理方法。

**M2M** 机器对机器,用于描述任何能使联网设备交换信息,并在没有人工帮助的情况下进行操作的技术。

**MVS** 多变量系统,具有多个控制回路的系统。

## N

**NASA** 国家航空航天局,负责民用航天计划以及航空航天研究的美国政府机构。

**NEMS** 纳米机电系统,一类在纳米尺度上集成电气和机械功能的器件。

**NERC** 北美电力可靠性协会。

**NFC** 近场通信是一组协议,使得电子设备能够建立彼此之间的通信距离通常为 10 厘米或更小的无线电通信。

**NICB** 国家保险犯罪局,美国首例被盗车辆数据库,向公众免费提供服务。

**NIST** 国家科学技术研究院实验室经常与工业密切合作,进行世界级研究,推动美国技术基础设施建设,帮助企业不断改进产品和服务。

**NICT** 网络、信息和通信技术。

**NRE** 非工程成本是新产品开发的一次性前期成本。

**NSF** 国家科学基金会是美国国会独立的联邦机构,也是唯一一个联邦机构,其任务包括支持除了医学的基础科学与工程领域。

## O

**OBEX** 对象交换,一种定义数据对象的传输协议和可用于交换这些对象的两个设备之间的通信协议。

**OLED** 有机发光二极管,通过在导体之间放置一系列有机薄膜而制造的发光技术。

**OPAK** 面对自主的工程机电一体化自动化组件的开放平台,可用于工厂开发人员的信息和通信技术,因此可用于允许类似工程的工作。

**OpenCL** 开放计算机语言是一种用于编写跨异构平台执行的程序的框架。

**OpenUP** 开放统一工序是 Eclipse 基金会开发的一个开源流程框架。

**OS** 操作系统是一种管理计算机系统资源的计算机程序。

## P

**PAD** 物理架构图用于企业环境管理。

**PAL** 可编程阵列逻辑,具有宏单元结构的预制芯片,其通过交换矩阵连接并用于实现组合逻辑电路。

**pASIC** 可编程应用程序专用集成电路,一种专为特定目的而设计的非标准集成电路。

**PCAST** 总统科学技术顾问委员会。

**PDA** 个人数字助理是一种将计算、电话/传真、互联网和网络功能相结合的手持设备。

**PDC** 生产数据收集是生产管理、生产计划和库存管理流程的一个组成部分。

**PFCN** 环境流程控制网络支持可编程逻辑控制器和环境计算设施之间的通信,以监控和控制制造过程。

**PFD** 流程文档,主要用于需要描述主要组件之间关系的工艺过程。

**PHY** 物理层是 ISO/OSI 模型中的第一(最低)层。

**PI** 比例积分是一种算法,它将每个采样时间的控制器输出信号计算并发送到最终控制元件。

**PIC** 可编程接口控制器是可编程的电子电路,用于执行大量任务。

**PID** 比例积分微分算法是将每个采样时间的控制器输出信号计算并传输到工业控制系统常用的最终控制元件。

**PIN** 生产创新网络将大学研究和商业相互连接。

**PLC** 电力线通信是一种通过现有电缆发送数据的通信技术。

**PLC** 可编程逻辑控制器是用于典型工业机电过程自动化的计算机。

**PLD** 可编程逻辑器件,用于构建可重构数字电路的电子元件。

**PR** 生产率是指在一段时间内可以生产的商品数量。

**PROFIBUS** 在自动化技术中,过程总线是一种总线通信的标准。

**PWM** 脉宽调制是使用数字源产生模拟信号的方法。

**PZH** 汉诺威生产技术中心。

## Q

**QFD** 质量功能部署,一种将定性用户需求转化为定量参数的方法,用于部署功能形成质量。

**QR** 快速响应码,一种 2D 条形码,用于通过智能手机轻松获取信息。

## R

**RAM** 随机访问存储器,允许以读或写方式访问



数据项的计算机数据存储设备。

**RIA** 美国机器人研究所，进行与工业和社会工作相关的机器人技术的基础和应用研究。

**RISC** 精简指令集计算机，一种微处理器，旨在执行较少类型的计算机指令，使其能够以更高的速度运行。

**RF** 射频，与无线电波传播相关的电磁频谱内的任何频率。

**RFID** 射频识别是指由小芯片和天线组成的小型电子设备。

**ROM** 只读存储器，已预先记录数据的计算机存储器。

**RoRo** 滚装滚卸是设计用于装载轮式货物的船只。

**RVA** 需求验证方法。

S

**S + H** 采样和保持电路捕获模拟信号，并在某些操作期间保持模拟信号。

**SAFO** 操作员安全警报，是向航空界提供警告、教育和提出建议的信息工具。

**SBS** 系统分解结构用于将系统分解成易于管理的组件。

**SCADA** 监控和数据采集，一类软件应用程序的过程控制，从远程位置实时收集数据，以控制设备和环境。

**SDL** 规范和描述语言是针对响应式和分布式系统行为的明确规范和描述的语言。

**SECOE** 系统工程基地中心。

**SHE<sup>2</sup>MS** 智能家居环境能源管理系统。

**SIMILAR** 状态、调查、模型、整合、发布、评估、重新评估。

**SISO** 单输入单输出系统是具有一个输入和一个输出的单变量控制系统。

**SITA** 是一家为航空运输业提供 IT 和电信服务的跨国信息技术公司。

**SLD** 系统级设计是一种电子设计方法，主要侧重于较高的抽象层面。

**SME** 中小型企业是人员数量低于某一限度的企业。

**SMS** 短信服务（短消息）。

**SMT** 可满足性模理论，在一个或多个理论中检验逻辑公式的可满足性。

**SOA** 面向服务的架构，一种用于基于使用服务创建架构的方法。

**SOAP** 简单对象访问协议，允许在不同操作系统

上运行的程序使用 HTTP（超文本传输协议）和 XML（可扩展标记语言）进行通信的消息传递协议。

**SoC** 芯片系统，是对所有必要的电子电路和部件的封装，并用于单个集成电路上的系统。

**SoGP** 良好实践标准，一个以业务为中心的，实用和全面的指导，以确定和管理组织及其供应链中的信息安全风险。

**SPI** 串行外设接口是通常用于在微控制器和小型外设之间发送数据的接口总线。

**SPLD** 简单的可编程逻辑器件，一种可编程逻辑器件，其复杂度低于复杂的可编程逻辑器件。

**SPP** 单用途处理器是一种旨在执行一个程序的数字电路。

**SQL** 标准查询语言，用于从数据库获取信息和更新数据库的标准交互式编程语言。

**SRAM** 静态随机存取存储器，随机访问存储器（RAM），只要提供电源，就将数据位保留在存储器中。

**SRD** 涉众需求文档可以识别用户的需求。

**SRS** 软件需求说明书表示企业或企业运营层面的观点。

**SRTS** 软实时系统。

**SSE-CMM** 系统安全工程能力成熟度模型。

**SysML** 系统建模语言，一种通用的图形建模语言，用于指定、分析、设计和验证一个工程系统。

T

**TCP** 传输通信协议是定义如何建立和维护应用程序可以交换数据的网络会话的标准

**TDMA** 时分多址是数字蜂窝电话通信中用于增加可携带数据量的技术。

**TML** 任务管理层是一种设计技术，其中应用程序分为三个部分：表示层、业务逻辑层和数据层。

**TUI** 有形的用户界面建立在将物理表示的数字信息置于实际空间中的技能之上。

U

**UAV** 无人驾驶飞行器，一种可以遥控或自主的无人驾驶飞行器，它能够感知周围的环境，并自行导航。

**UC** 单位成本是指某公司生产、储存和销售某一

特定产品所产生的成本。

**UGV** 无人驾驶地面车辆是与地面接触并且没有车载人员存在的情况下运行的车辆。

**UML** 统一建模语言,一种用于建模业务和类似过程的标准可视化建模语言,包括基于软件的系统的分析、设计和实现。

**UPA** 通用电力线协会,第一个全球和通用 PLC 协会,涵盖市场和所有 PLC 应用。

**UPnP** 通用即插即用,这是一种使用互联网和 Web 协议将诸如 PC、外围设备、智能家电和无线设备等设备插入网络并自动识别的标准。

**UPC** 通用产品码是分配给零售商品的独特的 12 位数字,用于识别销售的产品和供应商。

**URL** 统一资源定位器,可在 Internet 上访问的文件的唯一地址

**USB** 通用串行总线,将计算机连接到外围设备的接口。

**UUV** 通用串行总线是四针标准化 I/O 总线,用作计算机端口的串行接口。

**UWB** 超宽带是一种无线技术,用于在很短的距离内以很低的功率在宽频谱范围内传输大量的数字数据

## V

**VDMA** 德国机械工业协会是欧洲资本货物行业的全行业网络。组织了与市场密切合作的 37 个专业协会。

**VHDL** 超高速集成电路硬件描述语言,描述了电子系统的行为和结构,但特别适合作为描述数字电子硬件设计的结构和行为的语言。

**VOC** 客户的声音是用于商业和 IT 的术语。

**VoIP** 基于 IP 协议的语音通话是互联网电话的技

术基础。

**V2I** 车辆对基础设施,车辆与道路基础设施之间关于安全与运营的关键数据的无线交换

**V2V** 车对车通信,这种通信可以警告驾驶员,但不控制车辆。

**V&V** 验证和确认,一起用于检查系统、服务或产品是否符合要求和规范并且符合其预期用途的独立程序。

## W

**WBAN** 无线区域网络,专门的网络概念,在 IEEE 802.15 的背景下为单人通信的设备。

**WEF** 世界经济论坛是瑞士非盈利基金会。

**Wi-Fi** 无线保真传输是 WiFi 联盟的标志。

**WIP** 是指在不同阶段的产品中部分完成的产品生产和所有的原料。

**WLAN** 无线局域网是指本地无线网络,主要是 IEEE 802.11 系列的标准。

**WSDLWeb** 服务描述语言,一种基于 XML 的接口定义语言,用于描述 Web 服务提供的功能。

**WSN** 无线传感器网络,一组具有通信基础设施的专用传感器,用于监控和记录不同地点的环境。

## X

**XML** 可扩展标记语言,一种简单、非常灵活的文本格式,最初旨在应对大规模电子出版的挑战,但在互联网上的各种数据交换中也起着越来越重要的作用。

**XP** 极限编程实现了一个促使团队变得高效的简单而有效的开发环境。

# 索引

索引中的页码为英文原书页码, 与书中标注的页码一致。

## A

- Abstraction (抽象), 2, 39, 40, 71, 73, 87-89, 94, 206, 213, 284
- Acceleration (加速度), 14, 98, 124, 211, 351
- Accumulator (累加器), 73-76
- Accuracy (准确性), 4, 56, 119, 213, 216, 322, 346, 386
- Acme (一种通用的 ADL), 93
- Active (主动式的)
  - sensors (传感器), 155
  - tag load (标签负载), 148
  - tags (标签), 146, 149, 171, 210
- Active filters (有源滤波器)
  - ADL (架构开发语言), 93
- Actuating (执行), 58, 64, 83, 84, 107, 112, 181, 212, 238, 316
- Actuator (执行器)
  - variable (变量), 64
- Adaptive (自适应的)
  - control (控制), 112, 117, 218-221
  - observer strategy (监控策略), 112
- Advanced (先进的)
  - algorithms (算法), 224
  - measurement system (测量系统), 220
- Advanced Research Projects Agency Network (高级项目研究代理网络, ARPANET), 141
- Agile (敏捷的)
  - design automation (设计自动化), 88
  - manufacturing (生产), 368, 373
  - modeling (建模), 289
  - processes (过程), 288, 289
  - software development (软件开发), 235, 287-289
  - unified process (统一过程), 289, 302
- Airline's medical center (飞机上的医疗中心), 173
- AlarmNet (警报网络)
  - mobile ECG (移动心电图), 110
- Algebraic equations (代数方程式), 59
- Allocation (分配), 71, 72, 154, 180, 224, 263, 268, 269, 274, 276, 298
- Alternate current-to-direct current (交流电流 - 直流电流, AC-DC), 107
- Ambient (周围的)
  - environment (环境), 92, 94, 126
  - intelligence (智能), 84, 119
  - robotic systems (机器人系统), 119
  - temperature (温度), 93
  - world (世界), 119
- Analog-to-digital converter (模数转换), 157, 158, 181
- Analysis (分析)
  - advanced (先进的), 361, 372
  - physical (物理的), 87, 94
  - simulation (仿真), 94
  - techniques (技术), 72, 87
- Analytical (分析的)
  - model (模型), 39
  - solution (方案), 1, 23-29
- Analyzing machine data (分析机器数据), 357
- Android (安卓), 323
- Anomaly detection (异常检测), 338
- Apache (阿帕奇), 295
- App (应用), 167
- Application (应用)
  - software (软件), 38, 345, 355
  - specific integrated circuits (专用集成电路), 39, 53, 70
- Application-specific integrated circuits (专用集成电路应用, ASIC), 39, 53, 70
- Approximate computation (近似计算), 218
- A priori knowledge (先验知识), 2, 3, 5, 17, 127
- Architecture (架构)
  - analysis and design language (分析和设计语言), 40

Architecture Analysis and Design Language (架构分析和设计语言, AADL), 40

Architecture design (架构设计), 93

Arithmetic logic (算术逻辑)

- register file (寄存器文件), 42
- unit (单元), 75, 76

Arrivals (到达), 197, 298, 299

Artificial intelligence (人工智能) 200, 215, 223, 231, 353, 379

Assembly (装配)

- lines (线), 310, 323, 373
- stage (阶段), 328

Assess performance (评估绩效), 258

Assignment models (分配模型), 121

Assisted living (生活辅助系统), 99, 103, 111, 119

Asymptotically stable (渐近稳定的), 32, 33

Attacker (攻击者), 101, 225, 338

Attack-resilient control systems (攻击复原控制系统), 118

Attributes (属性), 159, 247, 298-300

Augmented operators (增广操作), 316

Authentication (身份认证), 151, 333, 338

Auto-ID (麻省理工学院 Auto-ID 实验室)

- center (中心), 142, 170
- labs (实验室), 141, 142

Automated (自动化的)

- code synthesis (密码合成), 46, 117
- manufacturing processes (生产流程), 317, 379, 383
- manufacturing system (制造系统), 369, 378, 380-382
- reconfiguration (重组), 331

Automatic (自动的)

- data acquisition (数据采集), 151
- identification techniques (识别技术), 141, 209
- payment collection (收费系统), 130
- reminders (提醒服务), 124
- transmission control (变速器控制), 122

Automation (自动化)

- engineering (工程), 360, 365
- innovative (创新的), 124, 165, 318
- process (过程), 331
- pyramid (金字塔), 322, 373
- system (系统), 82, 86, 255, 327, 380

Automotive (汽车)

- engineering (工程), 89, 100

- industry (行业), 41, 89, 115, 209

Autonomous (自治)

- acting computer programs (执行计算机程序) 317
- activate the maintenance procedure (激活维护程序), 317
- adjust the machine resource (调整机器资源), 329
- adjusting the machine set-up (调整机器安装), 329
- behavior (行为), 82, 222-225
- controller lower level (低级别控制器), 224
- controller upper level (高等级控制器), 224
- driving car (驾驶汽车), 100
- functioning mechatronic assemblies (运行的机电组件) 255, 256, 332
- sensors (传感器) 158, 382
- supervision level (监督级别), 224
- system (系统), 185, 212, 222-225, 231
- urban mobility (城市流动性), 122
- vehicles (汽车), 99, 222-225

Availability (水平), 3, 52, 54, 104, 141, 143, 162, 164, 166-169, 186, 189-192, 196, 198-200, 211, 212, 358, 386

Axis (轴), 226

Axis controllers (轴控制器), 226

## B

Backbone (核心技术), 86, 111, 124, 126

Backcasting (后向估计), 121

Back-end system (后端系统), 363

Backscatter modulation (反向散射调), 148, 149

Backtracking (回溯), 121

Bandwidth (带宽), 41, 104, 126, 148, 158, 163, 202

Barcode (条码), 108, 127, 142, 175, 209

Batches of parts and materials (零件和材料), 310

Battery lifetime (电池寿命), 107

Behavior (行为)

- collective (整体的) 1
- level (水平), 3

Bellman-ord algorithm (Bellman-Ford 算法), 160

Bernoulli line (伯努利线), 334

Best practice (最佳实践), 54, 99, 108, 194, 230, 271, 283, 340, 344, 366

Big data (大数据), 110, 318, 353, 361, 368

Binary semantic relations (二进制的关系), 95

Binding (绑定), 72, 206, 285

Black-box (黑盒), 4, 267, 286, 300, 384

perspective (角度), 285

Block diagram (框图), 6, 30, 31, 57-61, 66, 75, 272

Bluetooth (蓝牙)

- devices (设备), 154, 168, 187, 194, 198, 319, 336

Boolean value (布尔值), 296

Bosch Software Innovations (Bosch 软件创新)。354-359

Boundary conditions (边界条件), 67, 216

Buffer (缓冲区)

- downstream (下游), 334
- upstream (上游), 334

Business (商业)

- model (模型), 82, 90, 255, 349, 354, 357-361, 365, 367
- networked (网络化), 366
- potential (潜力), 90

process execution language (业务流程执行语言, BPEL), 321

- to business (企业对企业, B2B), 103, 104, 319, 368
- to customer (企业对客户, B2C), 103, 104

## C

C (C 语言), 91, 98

C + + (C + + 语言), 40, 91, 98

Capacity (容量), 75, 88, 92, 107, 109, 114, 147, 175, 176, 193, 210, 298, 300, 309, 312-314, 325, 331, 333, 334, 349, 371, 385, 386

Capital commitment (资金投入), 351

Carrier (运输)

- buffer (缓冲区), 334
- circulating (循环流转), 335
- empty (空的) 334
- frequency (频率), 162, 198

Carry flag (进位标志), 75

Case-dependent skills (案例性知识), 377

Central (中心的)

- limit theorem (极限定理), 215
- processing unit (处理单元, CPU), 73-76, 78, 79

Certainty (确定性) 213

Channel hopping and blacklisting (信道跳频和黑名单), 107

Characteristic (特征)

- equation (方程), 28
- matrix (矩阵), 26
- polynomial (多项式), 26, 28, 33

Class diagram (类图), 176, 177, 286

Clay (粘土), 188

Climate change (气候变化), 125, 165

Clock (时钟)

- cycles (周期), 45, 76, 98, 158

Closed (关闭的)

- loop gain (回路增益), 61-63
- manufacturing line (生产线), 334-336
- transfer function (传递函数), 56, 62

Cloud (云)

- based automated telemedicine (基于自动化远程医疗), 111
- based services (基于服务), 84
- computing (计算), 86, 119, 124, 340
- manufacturing (制造领域), 116

Clustering (聚类), 105, 106, 146, 159, 182, 297, 383

Codesign (协同设计), 37, 69-73, 79

Cognitive (认知的)

- abilities (能力), 186, 311
- process (处理), 215

Column vector (列的向量), 9, 12, 16

Commercial industrial sectors (商业工业部), 371, 372

Communication (通信)

- blocking protocol (阻塞协议), 335
- channel (通道), 94, 102, 337
- confidential (可信的), 107, 110
- constraint (约束), 40, 106
- high-level (高级的), 296
- machine-to-machine (机器对机器, M2M), 102, 103, 164, 316, 318
- mobile (移动的), 125
- networks (网络), 104-106, 112, 123, 142, 152, 158, 160, 161, 164, 188, 198, 203
- peer-to-peer (点对点), 108, 297
- secure (安全的), 102, 107
- wired (有线的), 102, 125, 143
- wireless (无线的), 102, 110, 127, 154, 319, 382, 383
- workflow (工作流), 195

Companies requirements (公司的需求), 249, 368

- Competence centre (能力中心), 315, 360, 365, 366
- Competitive global market (竞争激烈的全球市场), 313
- Compiler (编译器), 39
- Completeness (完整性), 213, 224, 251, 259, 263
- Complex (复杂的)
- behavior (行为), 217
  - control system (控制系统), 217
  - eigenvalues (特征值), 28
- Component (组件)
- developers (开发人员), 358
  - organize themselves (自我管理), 332
  - predictable (可预测的), 88, 89
  - reliable (可靠的), 88, 89
- Composite structure (复合结构), 4, 34
- Computer-aided design (计算机辅助设计, CAD), 39, 329
- Concept map (概念图), 87, 101
- Concurrency (并发的), 70, 89, 118, 247
- Condition monitoring (状态监视), 357
- Conductive polymers (导电聚合物), 188
- Confidentiality (机密性), 110, 168, 199
- Connecting intelligent devices (连接智能设备), 343
- Connections (连接), 44, 45, 47, 48, 50, 51, 68, 84, 103, 107, 124, 143, 144, 152, 203, 212, 226, 298, 300, 319, 320, 328, 331, 336, 338, 355
- Connectivity (连接), 48, 84, 103, 125, 126, 143, 164, 387
- Conservative (保守的)
- response (响应), 230
  - tuning (调整), 230
- Consumer interaction system (消费者交互系统), 103-104
- Context-aware computing (上下文感知计算), 200, 201, 207
- Control (控制)
- derivative (衍生的), 62-69
  - integral (积分的), 62-69
  - loop (环), 56, 58, 59, 224, 238, 337
  - proportional (比例的), 62-69, 217
  - system (系统), 3, 29-31, 56-69, 92, 93, 98, 107, 118, 122, 125, 127, 156, 165, 167, 207, 216, 217, 223, 224, 226, 258, 276, 316, 319, 320, 326, 349, 372
- Controllability (可控性), 1, 8, 17-23, 34, 112, 127
- Controllability matrix (可控性矩阵), 18, 19
- Controllable (控制的)
- completely (完全地), 17-19
  - differential (差分的), 17
  - particularly (特别地), 17
- Controller (控制器)
- area network (局域网, CAN), 217
- Conveyer belt (传送带), 175, 179
- Convolution integral (卷积积分), 25
- Coordination (协调), 40, 69, 90, 107, 116, 127, 186, 215, 224, 226, 238, 313, 318, 325, 336, 351, 364, 385
- Corporate partners (企业合作伙伴), 315
- Correctness (正确性), 54, 70, 97, 224
- Cosimulation (协同), 70, 72
- Cost advantages (成本优势), 312
- Cosynthesis (协同综合), 70
- Cradle, 236, 239, 259, 260, 262, 264-268, 271, 273, 276, 277, 279, 281, 282
- Cradle®, 235, 262
- Cradle-7, Cradle-7, 260
- Cruise control (巡航控制), 122
- CUDA (统一计算设备架构), 98
- Customer (客户)
- product manufacturing (产品制造), 312
  - requirements (需求), 249, 292
  - view (角度), 292
- Customizable products (可定制的产品), 314, 324
- Cyber (信息)
- attacks (攻击), 106
  - crime (犯罪), 332, 339, 340
  - physical connector (物理连接器), 92
  - physical energy system (物理能源系统), 104-106
  - physical interface (物理接口), 93
  - physical manufacturing systems (物理制造业系统), 316, 367
  - physical military systems (物理军事系统), 117
  - physical nodes (物理节点), 92
  - physical production system (物理生产系统), 311
  - physical system (物理系统), 1, 2, 7, 9, 17, 81-134, 144, 186, 190, 196, 208, 235, 256-259, 262-268, 270, 271, 273, 274, 276-278, 290-295, 316, 327, 329, 349, 378, 387

physical system security (物理系统安全), 372  
 physical transducer (物理转换器), 92, 94  
 processes (过程), 85  
 space (空间), 94, 190, 336  
 ware (软件), 316  
 Cyber-physical systems (信息物理系统, CPS), 81-134, 186, 235-239, 243, 256-259, 262-266, 268, 270, 271, 273, 274, 276-278, 296, 312, 313, 316, 324, 325, 327, 329, 330, 337-340, 349, 360, 365, 367, 368, 372, 378, 381, 385  
 Cycle time (循环时间), 309, 334, 358, 370, 371

## D

Damping (阻尼), 13  
 DARPA (美国国防高级研究计划署)  
   basic rules (基本规则), 100  
   grand challenge (盛大的挑战), 99, 225  
 Data (数据)  
   acquisition (采集), 151, 156, 387  
   analysis (分析), 111, 350, 351, 357, 370  
   analytics (分析), 333, 354, 372  
   base management system (库管理系统), 110  
   base system (库系统), 353  
   big (大的), 110, 318, 333, 353, 360, 361, 372  
   biometric (生物型的), 112  
   bus (总线), 74-76  
   centric approach (为中心的方法), 159, 259, 260  
   clean up (清理), 131  
   exchange (交换), 48, 96  
   flow language (流语言), 40  
   flow path (流路径), 42  
   fusion (融合), 112, 213, 216  
   fusion domains (融合域), 214  
   measured (测量的), 2, 151, 168, 329, 382  
   processing (处理), 155, 318, 324, 382  
   security (安全), 110  
   smart (智能的), 110  
   sources (来源), 318, 324, 327, 333, 349, 350, 353  
   transmission (发送), 102  
 Decentralization (分散), 152, 159, 202, 325, 331, 346, 381, 385, 386  
 Decision-making (决策的), 86, 110, 124, 151, 201, 223, 258, 318, 329, 338, 356, 381, 384  
 Declarative knowledge (陈述性知识), 377  
 Deductive method (演绎法), 5  
 Definition and specification requirements (定义和规范需求), 292  
 Degrees of freedom (自由度), 119, 226  
 Demand models (需求模型), 121  
 Demographic change (人口变化), 368, 387  
 Deployment of personnel (人员的部署), 380  
 Descriptive analytics (描述性分析), 356  
 Design (设计)  
   automation (自动化), 88, 256  
   co (协同), 37, 69, 71-73  
   complexity (复杂性), 88  
   computer aided (计算机辅助), 39, 329  
   flow (流程), 72, 88  
   forefront (前沿), 339  
   integrated (集成), 71, 72  
   metric (指标), 52-55  
   phase (阶段), 40, 70, 287  
   process (过程), 39, 48, 49, 71, 72, 236, 239, 281, 285, 293  
   productivity (生产率), 37, 88  
   space exploration (空间探索), 54, 94  
   system level (系统等级), 69, 266, 290  
   tool (工具), 49, 99, 101, 372  
 Desktop computer (台式电脑), 41  
 Destructive modifications to files (对文件进行破坏性修改), 338  
 Deterioration (劣化), 358, 385  
 Deterministic (确定性的), 23, 39, 386  
 Device world (设备世界), 208  
 Diagnosis capabilities (诊断能力), 212, 326  
 Diagonal matrix (对角矩阵), 23  
 Difference equations (差分方程), 219  
 Differential equation (微分方程), 8, 9, 14, 32, 87  
   first order (一阶), 14, 16  
   nonlinear (非线性的), 13  
 Digital (数字的)  
   analog converter (模拟变换器), 43  
   enabled education (可行的教育), 125  
   manufacturing (制造), 115, 116, 308-320, 322-347, 349-351, 353-358, 360-363, 365-

373, 378-385, 387  
manufacturing enterprise (制造企业), 372  
natives (原住民), 167, 387  
output signals (输出信号), 212  
product memory (产品记忆), 325  
revolution (革命), 324, 341  
skills (技能), 378  
system (系统), 69, 70, 72  
transformation (转型), 378, 387  
work environment (工作环境), 377  
working environment (工作环境), 378  
world (世界), 209, 311  
Digital product memory (数字产品记忆, DPM), 326  
Digital signal processor (数字信号处理器, DSP), 38, 42, 70  
Digitalized repair and maintenance assistant (数字化的维修和维护助理, DRIA), 344  
Digitally enabled (数字化的)  
crowd sourcing (众包), 126  
environment (环境), 125  
grids (网格), 125  
health care (健康关怀), 125  
industries (工业), 126  
transport (交通), 125  
Digitization (数字化), 313, 318, 326, 330, 332, 360, 361, 363, 378, 387  
Dijkstra algorithm, (Dijkstra 算法), 160  
Dirac pulse, Dirac (脉冲), 65  
Disappearing computer (消失的电脑), 84  
Disaster recovery (灾难恢复), 336  
Discrete (离散的)  
event based modeling (基于事件的模型), 238  
variable (变量), 22  
Displacement (位移), 14, 33  
Distributed (分布式的)  
application (应用程序), 95, 363  
computing environments (计算环境), 187, 207  
energy generation (能源生产), 105  
Disturbances (扰动), 56-58, 217, 221, 222  
Division of labor (分工), 311, 312, 380  
Double-roof model (双面屋顶模型), 72, 73  
Downstream services (下游服务), 360, 365, 368  
Downtime (停机)  
unplanned (计划外的) 350, 357  
Drone controller (无人驾驶控制器), 29

Dynamic-link library (动态数据库, DLL), 110

## E

Early warning system, (早期预警系统), 152, 329  
E-car (电动汽车), 126, 169, 199  
e-commerce (电子商务), 103, 104  
Economic growth (经济增长), 313, 378  
Efficient industry (有效的产业), 371  
e-government (电子政务), 125  
Eigenvalues (特征值), 26-29  
Eigenvectors (特征向量), 28  
Electrically erasable programmable read-only memory (电可擦除可编程只读存储器, EEPROM), 46, 175  
Electro (电子)  
magnetic capture (磁场捕获), 146  
mechanical design (机械设计), 371, 372  
Electronic (电子的)  
boarding pass (登机牌), 173  
medical record (医疗数据), 110  
product code (产品代码), 86, 119, 124, 142, 167, 170, 311, 340  
Embedded cloud computing (嵌入式云计算), 84, 86  
Embedded computing systems (嵌入式计算系统, ECS)  
large scale (大规模), 38  
medium scale (中等规模), 38  
small scale (小型), 38  
Emergence (出现), 81, 128  
Employee (员工)  
activities (活动), 379, 380  
engagement (参与), 369  
flexibility (灵活性), 386  
involvement (参与), 380  
Enabling technologies (可实现的技术), 86, 141, 143, 170, 307, 316, 325  
End effector (末端执行器), 226  
End-to-end (终端到终端)  
digital integration (数字整合), 115, 365  
transparency (透明度), 368  
Energy (能源)  
efficiency (效率), 104, 155, 159, 387  
grids (网格), 142  
management (管理), 166, 167, 170, 200  
monitoring (监测), 104



process (过程), 104  
 scavenging (节省), 383  
 system (系统), 104, 105, 107, 152, 164, 382  
 Engine management (引擎管理), 101  
 Enterprise software support (企业软件支持), 104  
 Entities (实体), 82, 105, 115, 143, 169, 199,  
 241, 263, 267, 298-300  
 Environment (环境)  
   dynamics (动态), 218  
   management layer (管理层), 201  
 Equation-based model (基于方程的模型), 39  
 Equilibrium (平衡), 33, 335  
 Equilibrium state (平衡状态), 32  
 Erasable programmable read-only memory (可擦除可  
 编程只读存储器, EPROM), 46, 50,  
 76, 175  
 Erroneous information (错误信息), 217  
 Error (误差)  
   criterion (标准), 5, 218-220  
   detection (检测), 58, 294  
   detector (检测器), 58  
   margin (幅度), 5  
   operational (操作的), 322  
   signal (信号), 57, 66, 217  
   sequence (序列), 220  
 Evaluation (评估)  
   continuous (连续), 72  
   incremental (增量), 72  
 Existence of solutions (解), 16  
 Exponential (指数)  
   distribution (分布), 335  
   function (函数), 24, 33  
   reliability models (可靠性模型), 334  
 Extensible Markup Language (可扩展标记语言,  
 XML), 55, 96, 206

## F

Fabrication (集成), 188, 307, 310, 325, 328  
 Facility management (设备管理), 170  
 Factory (工厂)  
   intelligent (智能的), 349  
   smart (智能的), 117, 307, 313, 316-325, 327,  
   333, 349, 365-367  
   shop floors (车间), 114, 310  
 Fall detection system (跌倒探测系统), 110  
 Far field (远场), 148

Fault (故障)  
   detection (检测), 338  
   diagnosis (诊断), 224, 326  
   localization (定位), 338  
   tolerant control (容错控制), 224  
 Feedback (反馈)  
   control (控制), 30, 57-62, 120, 159  
   haptic (触觉的), 112  
   law (规律), 62  
   loop (回路), 57, 61, 85, 217, 227  
   loop gain (回路增益), 61  
   proportional (比例), 63  
   straightforward (直接的), 63  
   system (系统), 60  
 Field programmable (现场可编程的)  
   gate array (门阵列), 39, 41, 44-51, 70, 73-76  
   logic array (逻辑阵列), 45  
 Field-programmable gate arrays (现场可编程门阵列,  
 FPGA), 39, 41, 44-46, 48, 50, 51, 73-  
 76, 217  
 Financial crisis (金融危机), 360  
 Finite (有限的)  
   and constant error (和恒定误差), 30  
   interval (区间), 18, 20  
   state machine (状态机), 154, 291  
 Fleet (流量)  
   dispatching (调度), 125, 129  
   management (管理), 125  
   operators (操作员), 125, 129  
   readiness (准备), 371  
   routing (管理), 125, 129  
   tracking (跟踪), 125, 129  
 Flexibility (灵活性)  
   of device operations (设备操作), 322  
 Flexible (灵活的)  
   manufacturing systems (制造业系统), 115  
   network (网络), 115, 312  
   work organization (工作组织), 368, 387  
 Flight control systems (飞行控制系统), 118  
 Floor plan (建筑平面图), 319  
 Force (力), 32, 57, 58, 70, 92, 132, 189,  
 217, 283, 284, 324, 347, 384  
 Forecasting of risks (风险预测), 361  
 Formal (形式化的)  
   level (模式) 94  
   methods (方法), 88, 117

## Forward (正向的)

loop gain (回路增益), 61

transfer function (传递函数), 61

## Fourier transform (傅里叶变换), 98

## Fraser-Potter fixed-interval (Fraser Potter 固定区间), 215

## Frequency (频率), 148, 150, 151, 153, 154, 158, 162, 164, 175, 176, 198, 210, 296, 320, 338, 351, 357

axis (轴), 34

domain (领域), 33

## Friction component (摩擦元件), 226

## Full customized circuit (完全定制电路), 44

## Fusion (融合)

data (数据), 112, 213-215

direct (直接), 215

indirect (间接), 215

## G

## Gain factor (增益因子), 63-68, 230

## Gate density (门密度), 44

## Gateway (网关)

cellular (蜂窝) 297, 301

satellite (卫星), 297, 301

## Gear box (变速箱), 226

## Generic array logic (通用阵列逻辑, GAL), 45, 76

## Gentelligent components (智慧组件), 342

## Global competitiveness (全球竞争), 370, 385

## Global positioning system (全球定位系统, GPS), 100, 101

## Globalized world (全球化世界), 120

## Gradient descent methods (梯度下降法), 219

## Graphical user interface (GUI) (图形用户界面), 173, 178, 180, 201, 202, 285, 287, 298

## Graphics processing units (图形处理单元, GPU), 98-99

## Gravitational force field (重力场), 13

## Greenhouse gases (温室气体), 165

## Grid load (电网负载), 167

## H

## Hacker (黑客), 117, 168, 198, 288, 336

## Hardware (硬件)

blocks (模块), 72

description language (描述语言), 40, 217

## encryption (加密), 333

software co-design (软件协同设计), 37, 69

software partitioning (软件划分), 52, 71

software trade offs (软件权衡), 71

## Harsh environmental conditions (恶劣的环境条件), 333

## Health care (健康保障), 101, 103, 110-113, 124, 125, 134

## Heart (心), 110-113, 202

## Hexadecimal code (十六进制代码), 76

## High (高)

fidelity model (逼真模型), 290

level abstract statements (级别抽象语句), 291

level guide to cybersecurity (级别网络安全的指南), 339

quality communication network, (质量通信网络), 366

wage economy (工资经济体), 369

## Highly collaborative manufacturing

environment (高度协作的制造环境), 372

## HipGuard (坐姿守卫), 110

## Holistic planning (整体规划), 351

## Home (家庭)

care (保障), 111

plug members, Plug (成员) 163

plug technologies, Plug (技术), 162

## Hop count (跳数), 160

## Horizontal integration (横向集成), 115, 365

## Hot spot (热点), 126

## Human (人力)

centered environments (为中心的环境), 186, 207

centered principle (为中心的原则), 384

computer interaction (计算机交互), 200, 202, 203

environments (环境), 187, 381

intelligence (智能), 379

labor (劳动力), 381

machine interface (机器界面), 84, 324

operators (操作), 268, 316, 382, 383

## I

## IATA (国际航空运输协会), 172

## IBM's Eclipse IDE framework (IBM 的 Eclipse IDE 框架), 93

## iCabinet, 111

- Identifiability (可识别性), 1, 8, 17-23, 127
- Identifiable (可识别的)
  - system (系统), 22, 127, 192
- Identity matrix (单位矩阵), 23
- IEC 562443 IEEE standard (IEC 562443 IEEE 标准)
  - 1061, 52
  - 29148, 235, 292
  - 802. 11, 123, 383
  - 802. 11b, 186
  - 802. 154, 296
  - P1775, 163
  - P1901, 163
- IMC-AESOP approach (IMC-AESOP 方法), 295
- Implicit knowledge (隐性知识), 379
- Improving process quality (改进加工流程质量), 357
- Impulse response (脉冲响应), 9, 10, 25
- Individualization of products (产品的个性化), 385-388
- Inductive coupling (电感耦合), 146-148, 176
- Industrial (工业的)
  - competitiveness (竞争力), 329, 341, 342, 370, 372
- Internet (互联网), 354
- Industrial revolution (工业革命)
  - first (第一次), 311, 312, 316, 379
  - fourth (第四次), 327, 378, 384, 385
  - second (第二次), 316, 379
  - third (第三次), 316, 327, 369, 379
- Industry 4. 0 (工业 4. 0) 86, 115, 307-373, 377-383, 385-388
- Inertia (惯性) 226
- Infinite error (无限误差), 30
- Information (信息)
  - corruption (腐蚀), 337
  - dissemination (传播), 123, 160, 253
  - flow property (流动属性), 340
  - leakage (泄露), 340
  - peer-to-peer (点对点), 108, 297, 316
  - processing (处理), 88, 189, 207, 238, 251, 359, 362
  - technology (技术), 108, 115, 168, 255, 311, 314, 317, 319, 324, 327, 360, 363, 367, 369, 370, 383, 386
- Infrastructure (基础设施)
  - digital (数字的), 125
- In-home health monitoring (家居健康监控), 110
- Initial condition (初始条件), 8, 12, 23, 33
- Initial state (初始状态), 127
- Innovation cycle (创新周期), 52, 355
- Input (输入), 127
  - matrix (矩阵), 14, 25
  - set (集合), 3
  - vector (向量), 12, 14, 25
- Input-output description (输入输出描述), 1, 9-11
- Instruction (指令), 38, 39, 73, 76, 77, 122, 128, 155, 241, 282, 332, 377, 379
- Insurance (保险)
  - industry (工业), 360, 361, 363
  - sector (行业), 361, 362
- Intangible (无形的), 377
- Integral control (积分控制), 62-66, 79, 229, 230
- Integrated (一体化的)
  - industry (工业), 330, 383, 384
  - manufacturing systems (制造系统), 86, 115, 310, 327
- Integrate system components (集成系统组件), 257
- Integration (整合)
  - end-to-end digital (端到端的数字), 115, 365
  - horizontal (平行的), 115, 350
  - realm (领域), 109, 212
  - vertical (纵向的), 96, 115
- Integrity (完整性), 110, 118, 168, 172, 199, 284
- Intellectual properties (知识产权), 91, 198, 339
- Intelligent (智能的)
  - agents (代理), 325, 386
  - parking services (停车服务), 125
- Interactive (交互式的)
  - collaboration (合作), 368
  - maintenance platform (维护平台), 344, 345
  - software synthesis (软件合成), 117
- Interconnectivity (互连性), 124
- Interface (接口), 8, 38, 50, 52, 54, 69, 84, 92, 93, 105, 110, 116, 120, 149-153, 166, 178, 179, 186-188, 190, 202, 205, 206, 212, 237, 244, 251, 252, 255, 258, 259, 263, 267, 268, 273, 274, 276, 281, 285, 286, 293, 329, 331, 380, 381
- Internet (互联网), 369
  - of everything (万物), 81, 103, 123-126, 386
  - of everywhere (任何地方), 85

of things (物体), 82-85, 102, 103, 114, 116, 124, 128, 141-147, 149-162, 164-177, 179, 181, 182, 186, 206, 313, 316, 317, 327, 333, 341, 354, 360, 385

of things data and services (物体数据和服务), 324, 325, 348, 360, 367, 369, 386

of things and services (物体服务), 124

protocol (协议), 123, 126, 142, 168, 332, 333, 338, 386

protocol suite (协议套件), 141

protocol version (协议版本), 6, 83, 186, 208, 331, 332

Internet of things (物联网, IoT), 82-85, 102, 103, 114, 116, 124, 128, 141-147, 149-162, 164-177, 179, 181, 182, 186, 206, 313, 316, 317, 327, 333, 341, 354, 360, 385

Internet Protocol version 6 (互联网协议版本 6, IPv6), 83, 186, 208, 331, 332

Interoperability (互操作性)

- semantic (语义), 96
- syntactic (语法), 96

Intrinsic complexity (固有复杂性), 89

Intrusion (入侵)

- effects (影响), 338
- method (方法), 338
- on components (组件), 338
- on subsystems (子系统), 338

Inventory (仓库)

- location (库位), 161

Investigate alternatives (调查方案), 257

iOS, 323

ISO/IEC 21827, 339, 340

ISO/IEC 27000, 339, 340

ISO/IEC 27001, 339

ISO/IEC 27002, 339, 340

IT security (IT 安全), 333, 342

## J

Java (Java 语言), 40, 41, 91, 108, 295, 322

Jobs (工作量), 258, 288, 308, 323, 331, 332, 335, 353, 361, 366, 378, 387

Joints (关节), 107, 226, 227, 283, 284

## K

Kinematic chain (运动链), 226

Knowledge culture (知识文化), 315

## L

Labor (劳动力)

- costs (成本), 130, 314, 381
- market (市场), 369
- policy (劳动政策), 378

Laplace (拉普拉斯)

- domain (域), 19
- operator (算子), 25, 67
- transform (变换), 15, 25-28, 30, 67

Laptop computer (笔记本电脑), 41, 190, 202, 345

Laser distance meters (激光测距仪), 100

Latency penalty (延迟), 98

Launch the system (启动系统), 258

Lean production (精细生产), 316

Learning (学习)

- collaborative (协作), 191, 192
- lifelong (终身), 191, 192, 284, 366
- mobile (移动的), 193-197
- objects (对象), 196
- to be (做人), 191
- to do (工作), 191
- to know (学习), 191
- ubiquitous (普适的), 192-197

Least squares method (最小二乘法), 219

Legacy (遗留)

- equipment (设备), 324
- standards (标准), 324
- system integration (系统集成), 379

Legal aspects (法律方面), 380, 381

level of complexity (复杂程度), 105

Life cycle (生命周期)

- approaches (方法), 235-237, 239-242, 252-255, 263, 267, 281, 292, 326, 332, 343, 347, 357, 369
- data (数据), 169, 199
- management (管理), 240
- sub processes (子过程), 241

Lifelong learning (终身学习), 191, 192, 284, 366

Lifetime (寿命), 107, 126, 159, 191, 192, 332, 371

Likelihood (可能), 358

Linear model (线性模型), 23-29

Linear system, 线性系统, 1, 15, 17, 27, 29, 34, 59, 127

Lines (线)

- clock (时钟), 50
- long (长), 47, 48
- short (短), 47

Linked process steps (链接的流程步骤), 350

Little's law (Little 法则), 307, 308

Location (位置)

- assistance (服务), 172
- independence (独立性), 322
- sensing systems (感知系统), 322

Locations, entities, arrivals and processes (位置、实体和入口工序, LEAP), 298

Locomotion (执行), 153

Logic (逻辑)

- array block (阵列块), 50
- cell arrays (单元阵列), 45
- gates (门), 39
- model (模型), 29

Low (低的)

- frequency interrogator (低频读写器), 148
- power communication systems (功耗通信系统), 154

Luggage (行李)

- identification (识别), 175
- tracking system (跟踪系统), 171, 174-179
- transportation (传送), 175, 176, 179, 180

Lumped (集中的), 23

## M

Machine (机器)

- feeling (感情), 343, 347, 348
- intelligent (智能), 329, 353, 372
- learning (学习), 353, 356
- networked together (连接在一起), 323
- readable instruction (读指令), 282
- sentiment (感情), 348
- textile (纺织品), 116
- work center (工作中心), 308

Machine-to-machine (机器-机器, M2M)

- process communication (进程通信), 318

Machinery manufacturers (设备制造商), 354

Macro (宏)

- cell array (单元阵列), 51

Magic triangle (魔术三角), 358

Maintainability (可维护性), 53, 54, 238, 256

Maintenance (维护)

- forecasting (预测), 318, 333
- interactive (交互), 344
- proactive (主动), 318, 333
- reactive (被动), 357, 358
- tasks (任务), 358

Malfunctions (故障), 337, 358

Malicious agents (恶意代理), 337

Management (管理)

- configuration (配置), 242, 294
- decision (决策), 237
- human resource (人力资源), 242
- information (信息), 242, 245
- infrastructure (基础设施), 242
- life cycle (生命周期), 240
- of intellectual property interests (知识产权利益), 372 project, 237, 243, 249, 294
- quality (质量), 242, 294
- requirement (要求), 96, 259, 294
- risk (风险), 242, 312, 360

Manipulator (操纵者), 185, 228, 230

Man-machine (人机)

- communication (交流), 324
- interaction (交互), 116, 323, 380, 384

Manufacturing (制造业)

- advanced (先进的), 86, 116, 332, 370
- agile (敏捷的), 307, 312-316
- automation (自动化), 349, 387
- business (商业), 319, 324, 328, 357, 358, 360, 372
- capabilities (能力), 326, 328, 331, 371, 381
- chains (链条), 115, 307, 313, 350
- companies (企业), 313, 324, 328, 357, 358
- components (组件), 378
- conditions (条件), 312, 325
- costs (代价), 370, 372
- cybersecurity in (网络安全所在) 336-340
- engineering (工程), 310, 346, 360, 365
- enterprise (企业), 315, 370
- environments (环境), 334
- equipment sector (设备部门), 360, 365
- execution system (执行系统), 115, 319, 322, 345
- facilities (设施), 255, 319, 321, 322, 332, 366, 367

- floor (地板), 142, 311, 354  
individualized (个性化), 329  
industry (产业), 327, 332, 341, 362, 365, 367, 371, 385, 386  
intelligent (智能), 86, 332, 354, 370, 387  
knowledge (知识), 372  
line (线), 114, 255, 307, 317, 318, 324, 329, 331, 334, 336, 357, 381  
machines (机器), 312, 316, 317, 323, 332, 349, 388  
markup language (标记语言), 321  
memory (存储器), 326  
modules (模块), 331  
networked (网络化), 115, 116, 307, 330, 365  
operations (操作), 317, 341, 350, 370  
orders (订单), 331  
plants (植物) 212, 319, 330  
practices (实践) 354, 370  
process (进程), 116, 310, 312, 313, 316, 317, 319, 320, 323, 325, 329-332, 340, 348-350, 355, 357, 366, 368, 371, 378-380, 382-387  
process-planning (过程规划), 331  
requirements (要求), 314, 325, 365  
revolution (革命), 312, 325  
robot (机器人), 120  
scheduling (调度), 340  
self-aware (自我认知的), 372  
shop floor (车间), 317, 326, 327, 330, 333, 336, 355, 386  
situation (情况), 318, 320  
smart (聪明的), 120, 311-313, 316, 317, 323, 327, 360, 365, 366  
solutions (解决方案), 370  
support technologies (支撑技术), 237, 349, 371  
system operator (系统操作员), 308  
task (任务), 88, 387  
textile (纺织品), 115  
world (世界), 324, 330, 332  
Maritime domain (海域权), 295  
Markov (马尔可夫)  
chain (链), 335  
property (属性), 335, 338  
random field (随机场), 338  
Markov random field (马尔可夫随机场, MRF), 338  
Mars pathfinder (火星探路者号), 223  
Mask programmable (掩模可编程), 44, 45  
Mass (质量), 32, 84, 212, 226, 311, 323, 326, 328, 330, 332, 386  
customized production (定制化生产), 328  
markets (市场), 313, 360  
production efficiency (生产效率), 328  
requirements (要求), 82, 126  
Mathematical (数学的)  
equations (方程), 1, 7-9  
model (模型), 2-5, 17, 20, 58, 121, 127, 236  
notation (符号), 7, 37, 62  
MATLAB, MATLAB (数学软件) 40, 69, 249  
Matrix-exponential solution (矩阵指数), 24  
Maximum-likelihood estimate (极大似然估计), 220, 221  
Mechanical flange (机械法兰), 226, 227  
Mechatronic, 机电一体化  
automation components (自动化组件), 255, 330  
Medical doctor on the flight (飞机上的医师), 173  
Mesh of networks (网络), 296, 297, 301  
Metropolitan areas (都市区), 120, 121, 125, 383  
Microcontroller (微控制器), 38, 39, 42, 70, 119, 153-155, 211, 217  
Microelectromechanical systems (微机电系统, MEMS), 112, 133, 152, 153, 188, 208, 212, 216, 382  
Microgrid concept (微电网的概念), 105, 106  
Microprocessor (微处理器), 38, 39, 41, 42, 70  
Microscale devices (微型设备), 153  
Middleware (中间件), 88, 130-132, 150, 316, 382  
Military devices (军事设备), 117  
Minimally invasive diagnostics (微创诊断), 112  
Minimize multiple designs (最小化多重设计), 372  
Misrouting of luggage (行李错发), 175  
Mission critical tasks (任务关键任务), 338  
Mistracking (跟踪失效), 132  
MobiHealth (移动健康), 110  
Mobile (移动的)  
phones (电话), 204, 322, 385  
technologies (技术), 164, 191, 193, 362  
Model (模型)

black box (黑盒), 7  
 complex (复合), 5  
 data based (基于数据的), 352  
 inaccurate (失准), 218  
 non-black-box (非黑盒模型), 7  
 physical (物理), 176, 276, 352  
 structure (结构), 4, 5  
 system (系统), 3, 4, 7, 8, 10, 11, 18, 95, 111, 121, 128, 251  
 validation (确认), 5, 7  
 Modelica (一种建模语言), 105, 227, 228  
 Modeling (建模)  
   advanced (先进的), 101, 116  
   axiomatic (公理的), 5  
   deductive (演绎的), 5-7  
   empirical (实验的), 5, 6  
   energy systems (能源系统), 105  
   experimental (实验的), 5  
   holistic (整体的), 101  
   and simulation tools (和仿真工具), 370  
   theoretical, 理论的, 5  
 ModelMaker (模拟软件), 300  
 Modularization (模块化), 291, 325, 330  
 Modular product design (模块化产品设计), 314  
 Monitoring (监控)  
   condition (状态), 353  
   devices (设备), 320  
   local (本地的), 297, 301  
   remote (远程的), 297, 301  
 Motion (运动), 32, 100, 112, 118, 122, 149, 210, 226, 311  
 Motor (电机), 226, 227  
 Multihop mesh networking (多跳网状网络), 297  
 Multiobject recognition (多对象识别), 129  
 Multipurpose manipulators (多用途的), 224  
 Multisensor fusion methods (多传感器融合方法), 213  
 Multivariable system (多变量系统, MVS), 9  
 Municipalities (城市), 126

## N

Nano (纳米)  
   electromechanical systems (机电系统), 112  
   technology (技术), 143, 153, 190  
 Narrow-beam sensors (方向型传感器), 155  
 National Institute of Standards and Technology (国家

标准与技术研究所, NIST), 340  
 Near Field Communication (近场通讯, NFC), 108, 154, 204, 319, 320  
 Network (网络)  
   configurations (配置), 297  
   interfaces (端口), 150, 355  
   layer (层), 110  
   structure (结构), 82, 159  
 N-hop (N跳)  
   network (网络), 155  
   single (单一的), 155  
   transmission (传输), 155  
 Noise variances (噪声方差), 215, 216  
 Nonplanar display surfaces (非平面显示器表面), 188  
 Nonrecurring engineering costs (非工程成本, NRE), 42, 53-55  
 Nonrepudiation (不可否认性), 169, 199  
 NP hard (NP难), 107  
 Numerical optimization methods (数值优化方法), 220  
 Nyquist criteria (Nyquist 准则), 33

## O

Observability (可测性), 1, 8, 17-23, 112, 127  
   matrix (矩阵), 20, 21  
 Observable (可观测的), 17, 20, 22, 127, 204, 255, 340  
   completely (完全地), 20, 21  
   differential (微分), 20  
   particularly (特别地), 20  
 Omnidirectional sensors (全向型传感器), 155  
 On-board (板上)  
   diagnostics (诊断), 212  
   information (信息), 125  
   security (安全), 125, 129  
   units (单元), 127, 130  
 Ontology (本体), 94, 95, 347  
 OPAK (面向自主的工程机电一体化自动化组件的开放平台), 330  
 Open (公开)  
   industry (工业), 163  
   loop control system (环路控制系统) 31, 57  
   manufacturing line (生产线), 255, 334  
   source (来源), 117  
   standard (标准), 96

Operating system (操作系统, OS), 38, 69, 117, 190, 293, 296, 322

Operational costs (运营成本), 132, 384

Optimized decision making (优化决策), 368

Optimizing product functions (优化产品功能), 354

Ordinary differential equations (常微分方程), 5, 7, 11, 26

Organic light-emitting diode (有机发光二极管, OLED), 188

Organizational challenges (组织挑战), 380-381

Organize themselves (自行组织), 324, 332

Oscillation (振荡), 13, 14, 63, 65, 230

Oscillatory system (振荡系统), 13

Output (输出), 127

equation (方程), 12, 22

error (误差), 219, 220

error least squares method (误差最小二乘法), 219, 221

matrix (矩阵), 155

set (集合), 3

vector (向量), 15, 25

Overshoot (超调), 56, 63, 64, 68, 79, 230

## P

Pacemaker (起搏器), 111, 113

Parameter (参数)

estimate (估计), 221

identifiable (可确定的), 22

identification (识别), 218-221

vector (向量), 22, 218, 220

Partial (局部, 偏的)

differential equation (微分方程), 7, 22

fraction expansion (分式展开), 26

Partitioning techniques (分区技术), 72

Passenger-related medical information (乘客相关的医疗信息), 173

Passive (被动)

sensors (传感器), 155

tag load modulation (标签负载调制), 148

tags (标签), 146, 170, 171, 209, 210

Pattern (模式)

in data (数据中的), 353, 356

recognition (识别), 187, 215, 377

Peak (峰值)

energy consumption (能量消耗), 169

time load (时间负载), 167

Pendulum (摆) 13

Perception (感知), 119, 128, 251, 385

Performance (性能)

criterion (标准), 5, 71, 221

Personal responsibility (个人责任), 384

Pervasive computing (普适计算), 84, 164, 186

Phase plane (相平面), 32

Physical (物理)

environments (环境), 127, 186-188, 201, 207

law (法律), 7, 57

nodes (节点), 92

objects (对象), 86, 174, 188, 209, 326

properties (属性), 87, 211

world (世界), 13, 84, 85, 87, 92, 97, 105, 133, 186, 207, 208, 216-218, 221, 238, 316, 325, 333, 349, 356, 365

Pick and place action (拾取和就地操作), 120

Plant Floor Control Network (工厂地面控制网络, PFCN), 333

Plug'n (插件)

play principle (玩的原则), 320

work (工作), 320

Plug and produce capability (插件和产品功能), 331

Polarion (普拉瑞)

application lifecycle management (应用生命周期管理), 295

requirements and test case management (需求和测试用例管理), 295

Port (端口)

dry (干的), 120, 235, 296-301

industry (工业), 295

seagate (希捷), 235, 296-301

Portable devices (便携式设备), 187

Power (功率)

consumption (消耗), 43, 44, 53, 106, 150, 154, 158, 165-167, 196

distribution (分布), 98, 166

generation (代), 166

grid generator (负栅发生器), 106

line communication (有线通信), 143, 162-170, 193, 196-200

line communication standards (有线通信标准), 162, 163

line communication technology (有线通信技术), 141, 162, 198

Pre (前期的)



competitive collaboration (竞争的合作) 370  
 production (产品), 120  
 Prediction (预测)  
   accuracy (精度), 347  
 Predictive model (预测模型), 351, 356, 357  
 Priori knowledge (先验知识), 257  
 Probabilistic dependence graph (概率依赖关系图), 338  
 Procedural epistemology (程序的认识论), 87  
 Process (加工, 工艺)  
   adjustments (调整), 325  
   chain (链), 115, 116, 320  
   networking (网络), 326  
   planning 4.0 (计划4.0), 345  
   planning and control (规划控制), 352  
   real-time control (实时控制), 119  
   stability (稳定性), 116  
 Processing (加工)  
   power (功率), 41, 143, 189  
   times (次数), 247-249, 335  
 Processor (处理器)  
   application specific (特殊用途), 42, 43, 70  
   general purpose (通用), 42, 53  
   single purpose (单用途), 42, 43  
 Product (产品)  
   code (代码), 316, 349  
   components data (组件数据), 307  
   development (开发), 8, 52, 115, 360  
   feature (特性), 293, 355  
   layouts (布局), 310  
   life cycles (生命周期), 264, 265, 326, 332  
   mix (混合), 307, 318  
   perspectives (角度), 252, 293  
     quality (质量), 212, 237, 241, 283, 350, 352  
   support process (支持过程), 370  
   term array (项数组), 51  
   volume (体积), 308, 310, 328, 367  
 Production (产品)  
   accelerate (加速), 98, 143  
   cycles (周期), 322  
   layout (布局), 307  
 Technological Centre Hannover (汉诺威技术中心), 341-348  
   rate (速率), 114, 308, 334  
   rules (规则), 317

Productivity growth (生产率增长), 313  
 PROFIBUS (现场总线), 82  
 Programmable (可编程的)  
   array logic (阵列逻辑), 45  
   computing units (计算单元), 39  
   interconnect array (互连阵列), 51  
   logic device (逻辑设备), 42, 44, 46, 50  
 Programming language (编程语言)  
   imperative (必要的), 89  
 ProModel (模拟软体), 299, 300  
 Proportional (成比例的)  
   control (控制), 62-65  
   integral derivative controller (积分微分控制器), 68  
 Proportional-integral-derivative (比例积分微分算法, PID), 65-69, 217  
 Prosthetic device (假体设备), 111, 112  
 Protocol, (协议)  
   adaptive (自适应的), 89  
 Prototyping (原型设计), 53, 54, 105, 110, 116, 120, 176, 204, 236, 251, 293, 295, 370-372

## Q

Quick response (QR) code (快速响应码), 108, 109, 344

## R

Radio (无线电)  
   frequency interference (频率干扰), 131  
   waves (波), 147  
 Radio frequency identification (射频识别, RFID)  
   active (主动地), 145, 146, 172, 209, 210, 296, 300  
   based vehicle tracking (基于车辆跟踪), 127-133, 171  
   chips arrays (芯片阵列), 175  
   enabled location assistance (位置服务), 172  
   enabled patient identification (病人身份卡), 172  
   enabled prescription containers (处方容器), 172  
   enabled wrist band (腕带) 172  
   middleware (中间件), 130, 151  
   passive (被动的), 145-150, 170, 210, 296, 300  
   readers (读者), 128, 130-132, 141, 145,

- 147-151, 172, 173, 175, 210, 318  
reading equipment (读取设备), 296, 301  
security (安全), 129, 171, 174, 209  
sensors (传感器), 128, 143, 155, 164, 165, 320  
system structure (系统结构), 129  
tagged luggage (标记的行李), 175  
tagged vehicle movements (标记车辆运动), 128  
tagging (标记), 209  
tags (标签), 103, 128-131, 141, 142, 145, 147-149, 170-173, 175, 209, 210, 296, 300, 318, 322  
technology (技术), 145, 146, 164, 170, 209  
tracking (追踪), 209  
transponder (应答器), 145  
Ramp function (斜坡函数), 2  
Random (随机)  
  action (行为), 218  
  effect (影响), 23  
Rank (秩), 16-22  
Rapid prototyping (快速成型), 105, 120  
RCI network (RCI 网络), 13  
Real-time (实时)  
  communication (通信), 88, 102, 167  
  control (控制), 119, 362  
  data stream analysis (数据流分析), 333  
  images (图像), 98  
  monitoring (监控), 83, 128, 170, 200  
  operation (运算), 131, 354  
Real-world system (现实世界系统), 4, 5, 13, 18, 218  
Receiver (接收器), 100, 102, 144, 154, 168, 169, 199, 247  
Recursive equations (递推方程), 22  
Reduced instruction set computer (精简指令集计算机, RISC)  
  architecture (架构), 38  
  core (核心), 38  
Reduced logistics costs (降低物流成本), 349  
Reevaluation (重新评估), 258  
Reference (引用)  
  acceleration (加速度), 226  
  position (位置), 227  
  velocity (速度), 226  
Regulatory compliance (法规遵从性), 379  
Reinsurance market (再保险市场), 361  
Reliability (可信度), 54, 85, 89, 98, 105, 107, 123, 125, 128, 131, 149, 166, 202, 224, 238, 329, 333, 335, 340, 350, 385  
Remote (远程的)  
  access (访问), 207, 333, 354, 357, 358  
  location (位置), 336  
  network access (网络访问), 337  
  server (服务器), 86  
Representation (代表), 2, 3, 7, 9, 39, 52, 56, 59, 72, 74-76, 83, 94, 204, 209, 213, 226, 253, 279, 294, 300, 345, 356  
Requirements 需求  
  analysis (分析), 95, 130-132, 242, 257, 279, 285, 287, 293, 294  
  customer (顾客), 249, 292, 314, 315, 349, 365, 367  
  definition (定义), 235, 236, 239, 242, 249, 253, 259, 260, 262, 263, 277, 279-282, 285  
  development (开发), 276  
  domain-related (领域相关的), 291  
  elicitation (启发), 95  
  engineering (工程), 95-96, 238  
  functional (功能性的), 263, 272, 274, 280, 291  
  identification (识别), 95, 133, 263  
  management (管理), 96, 235, 236, 239, 260, 262-268, 270-274, 276, 277  
  mixture (混合), 291  
  negotiation (谈判), 95  
  nonfunctional (非功能性的), 270, 274, 276, 281, 291, 293  
  quality (质量), 293  
  reliability (可信度), 98  
  specification (规格), 95, 288, 292  
  stakeholder (利益相关者), 237, 253, 262, 264-268, 279, 280  
  user (用户), 285, 291  
  validation (确认), 96, 253, 257  
  violation (违反), 294  
Resilient (灵活的)  
  manufacturing (制造), 316, 331  
  organization structures (组织结构), 314, 315  
Resolution characteristic (分辨率特征), 157  
Resource (资源)  
  efficiency (效率), 325, 367, 368

efficient manufacturing (加工效率), 312, 325, 367, 368  
 productivity (生产力), 367, 368, 387  
 Responsiveness (响应能力), 54, 191, 318  
 Revenue (收入), 354, 358  
 Revolute joints (转动关节), 226  
 Rhapsody (模型驱动可视化开发软件), 91  
 Rigid body manipulator (刚体操作器), 226  
 Ripple-carry adder (脉动进位加法器), 76  
 Risk (风险)  
   factors (因素), 129  
 Road (道路)  
   Infrastructure cyber physical systems (基础设施信息物理系统), 127  
   traffic systems (交通系统), 127, 128  
 Robotic (机器人的)  
   landmine detection (地雷检测), 156  
 Robots (机器人), 88, 98, 100, 118-120, 224, 310, 349  
 Robust (健壮的)  
   coding (编程), 89  
   control (控制), 221, 231  
 Rolling (旋转)  
   cold (冷的), 350  
   hot (热的), 350  
 Roll-on-roll-off (滚装, Ro-Ro), 295  
 Routh-Hurwitz criterion (Routh-Hurwitz 判别法), 33  
 Routing (路由)  
   algorithms (算法), 159  
   schemes (方案), 159, 160  
   strategy (策略), 160  
 Runtime system (运行时系统), 40  
 Runway incursion avoidance (航线入侵避免), 125

## S

Safety (安全), 54, 55, 99, 100, 111, 117, 118, 123, 125, 128, 162, 171, 172, 203, 284, 296, 298, 339, 366, 384, 387  
 Sample-and-hold circuit (取样保持电路), 156, 158  
 Scalable smart sensor (可伸缩智能传感器), 209  
 Scenario analysis (情景分析), 121  
 Scheduling (调度), 40, 72, 98, 331, 350  
 Scrap rates (报废率), 323, 333  
 Seamless interaction (无缝互动), 194

Security (安全)  
   application (应用), 159, 336  
   information (信息), 108, 336, 339, 340  
   network (网络), 333, 336, 340  
   risk in manufacturing (制造业的风险), 337, 340  
   techniques (技术), 339  
 Self (自我)  
   aware (认知), 86  
   calibration (校准), 217  
   control (控制), 82, 201, 207, 384, 387  
   determined human (做决定的人), 378  
   diagnostic (诊断的), 86  
   explanatory (解释的), 86, 353  
   optimization (优化), 82, 116  
   organized logistic approach (组织的逻辑方法), 317  
   organizing (组织), 288, 289, 383  
   organizing manufacturing (组织生产), 312, 325, 330, 349  
 Semantic (语义)  
   content (内容), 126  
   web (网络), 126  
 Semi (半的)  
   customized IC (定制逻辑模块), 44  
   passive tags (被动式标签), 147, 170, 171  
 Sensing (传感), 83, 84, 100, 105, 107, 116, 128, 145, 152, 153, 155, 164, 188, 190, 193, 201, 208-225, 238, 316, 370, 382, 383  
 Sensitivity (灵敏度), 152, 191, 252  
 Sensor (传感器)  
   actor networks (执行器网络), 186  
   array (阵列), 211, 212  
   fusion (融合), 124, 212, 216  
   intelligent (智能), 92, 151, 152, 329, 382  
   limitations (局限性), 218  
   node (节点), 152, 154-156, 158, 159, 338, 382, 383  
   node architecture (节点体系架构), 154  
   output (输出), 211, 216  
   sensitivity (灵敏度), 211  
 Sensors perception (传感器感知), 377  
 Series expansion (级数展开), 24  
 Server (服务器), 86, 104, 150, 194, 195, 198, 206, 286  
 Service (服务)

- life cycle (生命周期), 357
- oriented architecture (面向服务架构), 322
- world (世界), 208
- Service-oriented architecture (面向服务的架构, SOA), 295, 320, 321
- Set point (设定值), 65, 92
- S + H circuit (S + H 电路), 156, 158
- Shop floor (生产场所), 114, 115, 310, 311, 322, 334, 355, 370
- Signal (信号)
  - flow (流), 5, 247
  - modulated (已调制的), 162, 198
- Simple Object Access Protocol (简单对象访问协议, SOAP), 206
- Simulation (仿真), 5, 14, 40, 69-71, 86, 94, 119-121, 227, 228, 236, 238, 258, 259, 298-301, 331, 347, 362
- Simulink (仿真软件), 40, 69, 91, 249
- Single-input, single-output system (单输入单输出系统, SISO), 15, 228
- Six Sigma quality function development (六西格玛质量功能开发), 290
- Skilled workers (技术工人), 369
- Skills (技能)
  - development (发展), 332
- Skin (皮肤), 150, 188
- Small (小的)
  - and medium enterprises (中小企业), 341, 368
  - uncertainties (不确定性), 221
- Smart (智慧, 智能)
  - building (建筑物), 164, 165
  - cities (城市), 123-126, 144, 164
  - city (城市), 81, 102, 122, 165, 171
  - city technologies (城市技术), 126
  - devices (设备), 108, 109, 123, 165, 168, 185-187, 190, 195, 197, 198, 203-208, 317, 323, 324, 332, 368
  - dust (尘埃), 152, 153, 188
  - embedded devices (嵌入式设备), 187
  - energy (能量), 171
  - entities (实体), 143
  - environments (环境), 186, 187, 207, 367
  - factory (工厂), 117, 307, 325
  - Factory KL (KL 智慧工厂), 319, 321, 322, 327
  - flight tag software (飞行标签软件), 176
  - grids (栅格), 102-104, 106, 125, 144, 164, 166-169, 198
  - healthcare (保健), 144
  - home energy management systems (家庭能源管理系统), 167, 169-170
  - home solutions (家庭方案), 167
  - interaction (交互), 186
  - label tags (标签), 176
  - lighting (照明), 144
  - meter (电表), 164, 166-168, 198
  - meter software (电表软件), 166
  - metering (测量), 164, 168, 197
  - mobile devices (移动设备), 187
  - mobility (移动性), 100, 165, 171
  - networked devices (网络设备), 82
  - objects (物品), 143, 186
  - phones (电话), 109, 110, 116, 123, 125, 144, 167, 193, 197, 211, 323, 332, 385
  - ports (港口), 171
  - road monitoring (道路检测), 161
  - server-based devices (基于服务器的设备), 187
  - space (空间), 205
  - structures (结构), 99
  - supply chains (供应链), 117
  - system (系统), 189, 197
  - things (事物), 185, 186, 189
  - traffic lights (交通信号灯), 125
  - watch (手表), 124, 186, 187
  - world (世界), 141, 193
- Smuggling (走私), 296
- Social (社会的)
  - challenges (挑战), 378
  - factors (因素), 387
  - partnership (合伙), 369
  - work (工作), 380
- Socio-technical system method (社会技术系统方法), 380
- Software (软件)
  - crisis (危机), 283
  - description (描述), 291
  - development process (发展进程), 285
  - engineering (工程), 82, 88, 89, 91, 115, 189, 201, 235-241, 243, 244, 247, 249, 251, 252, 255-259, 263-265, 267, 268, 270, 271, 274, 276, 277, 283-296, 298-302
  - engineering approach (工程学方法), 89-91
- Engineering Code of Ethics (工程道德规范), 283

- flaws (缺陷), 225
- maintenance (维护), 91, 278, 284
- production (生产), 91, 282
- requirements (需求), 235, 290, 291
- requirements specification (需求规格说明), 292
- solutions (解决方案), 295, 329, 354
- specification (规格), 291
- system requirements (系统需求), 285, 286
- workbench (工具), 117
- Spatial distributed manufacturing resources (空间分布的制造资源), 316, 349
- S-plane (S平面) 68
- Sport events monitoring (运动事件监控), 161
- Spring (弹簧), 32
- Stability (稳定性), 8, 33, 56, 105, 107, 116, 159
  - analysis (分析), 1, 31-34
- Stable (稳定), 31, 33, 114, 156, 167, 230
  - asymptotically (渐近地), 32, 33
- Stakeholders (利益相关者), 95, 96, 130, 237, 239, 242, 253, 258, 262, 263, 268, 270, 272, 277, 279, 282, 288, 316, 367, 369
- Standardization (标准化), 175, 208, 235, 243, 252, 325, 339, 341, 354, 361, 366
- State (状态)
  - arbitrary (任意的), 17, 127
  - controllable (可控的), 18, 19, 127
  - determined (确定的), 11, 12
  - differential equation (微分方程), 25
  - equation (方程), 11, 12, 18, 19, 22, 23, 25-27, 127
  - initial (初始), 17, 18, 23, 25, 32, 127
  - internal (内部), 3, 154, 226
  - machine (机器), 39, 154, 291
  - of the art (的艺术), 116, 202
  - the problem (问题), 257
  - transition matrix (转移矩阵), 23, 25, 27
- State (cont.) (状态)
  - variable (变量), 1, 3, 9, 11-17, 20, 22-25, 59, 94
  - vector (向量), 12, 14, 23, 25, 27, 32, 228
- State-differential equation (状态微分方程), 25
- Statemate (复杂嵌入式系统原型设计工具), 91
- State-transition matrix (状态转移矩阵), 25
- Static random-access memory (静态随机存取存储器, SRAM), 46, 47, 51
- Stationary stochastic process (平稳随机过程), 219
- Statistics (统计), 204, 215, 353
- Steady state (稳态), 308
  - condition (状态), 30, 63
  - error (误差), 1, 29-31, 63-66
- Steel (钢铁)
  - coil (线圈), 350
  - converter (转换器), 351, 353
  - making (制造), 348, 350
  - mill (工厂), 349-351, 353
- Step (阶梯)
  - function (函数), 2, 31, 49, 68, 73, 330, 347
  - response (响应), 29, 63-65, 68
- Stereoscopic vision (立体视觉), 120
- Stochastic (随机的)
  - effects (效应), 218
  - process (过程), 220
  - stationary (平稳的), 220
- Structure (结构), 1, 5, 7, 8, 22, 39, 46-53, 58, 61, 72, 73, 75, 78, 79, 104, 115, 129, 156, 159, 188, 193, 223, 236, 237, 240, 260, 264, 268, 285, 291, 292, 310, 321, 322, 379, 380
- Submodels (模式), 298, 300
- Subroutines (子程序), 39
- Superposition integral (叠加积分), 25
- Supervisory (监控)
  - functionality (功能性), 224
- Suppliers field devices (供应商设备), 322
- Supply (供应)
  - chain (链), 115, 116, 120, 124, 129, 131, 142, 151, 171, 317, 328, 333, 339, 340, 342, 349, 368, 369, 371
  - models (模型), 121
- SysML (系统建模), 91, 94, 272
- System (系统)
  - analysis (分析), 8, 11
  - analysis level (分析工具), 94
  - behavior (行为), 2, 3, 8, 9, 39, 101, 224, 292
  - black box (黑盒), 267
  - dynamics (动力学), 307
  - engineering (工程), 115, 236, 237, 240, 252
  - engineering framework (工程框架), 90
  - functionality (功能性), 42, 72, 240

hard real-time (强实时), 97  
integration (集成), 71, 83, 331, 341, 379  
input (输入), 2, 11, 17, 127, 258  
integration (整合), 71, 255, 331, 379  
  level (水平), 70, 72, 73, 251, 262, 266, 290  
  linear (线性), 1, 15, 17, 23-29, 34, 59, 127  
matrix (矩阵), 15, 25, 28, 29  
modeling (建模), 95, 111  
of systems (的系统), 243  
on a chip (片上), 217  
output (输出), 56, 58  
relaxed (轻松的), 9-11  
response (应答), 156  
SISO (单输入单输出), 15, 228  
soft real-time (软实时), 97, 98, 120  
theory (理论), 8, 37  
transfer matrix (转移矩阵), 15  
zero order (零阶), 63

## T

Tablet PCs (平板电脑), 323, 332, 385  
Tacit knowledge (隐性知识), 236, 377  
Tag identification number (标记标识号), 132  
Tagged load (标签的负载), 129, 132  
Tagging (标记), 185, 208-222, 324  
Tangible (有形的)  
  computer interfaces (计算机界面), 212  
  solution (解决方案), 351  
  user interface (用户界面), 188  
Target tracking (目标跟踪), 141, 156  
Task (任务)  
  definition (定义), 383  
  management layer (管理层), 201  
Taylor-series (泰勒级数), 24  
Telerobots (远程机器人), 119  
Temperature (温度)  
  controller (控制器), 94  
  control system (控制系统), 92, 93  
Terrorism (恐怖主义), 296  
Test signals (测试信号), 2, 29  
  deterministic (确定性的), 2  
Textured triangles (三角纹理测试), 98  
Thermal resistivity (热电阻率), 92  
Thermostat (恒温器), 92-94, 167, 197

Thread switching (线程切换), 98  
Throughput (吞吐量)  
  high (高的), 131  
  time (时间), 114, 308  
Time (时间)  
  division multiple access (时分多址), 107, 163  
  domain (域), 26, 33, 295, 296  
  invariant (不变的), 13, 15  
  to market (上市), 37, 42, 52-54, 70, 88, 315, 372  
  to prototype (到原型), 53, 54  
  response (响应), 24  
Time-continuous model (时间连续模型), 219  
Tiny (微型的)  
  computing devices (计算设备), 86, 190  
  microcontroller (微控制器), 194, 197  
Toll points (收费点), 130  
Traceable (可追踪的), 192  
Tracking (跟踪)  
  local (局部), 296  
  location (定位), 171, 193  
  maintenance (维护), 172  
  and monitoring containers (和监控集装箱), 235, 296, 297  
  operation times (操作时间), 172  
  radioactive isotopes (放射性同位素), 172  
  vehicles (车辆), 131  
Traffic (交通)  
  control cyber physical system (控制信息物理系统), 127  
  control system, 122, 127  
  flows (流), 121, 125  
  related information (相关信息), 123  
  sign systems (标志系统), 122  
Trajectories (轨迹), 3, 12, 32, 33  
Transfer (转移, 传输)  
  characteristic (特征), 15  
  function (函数), 9, 15, 31, 39, 56-62, 68, 69, 164, 227, 228  
  lines (线), 310  
  matrix (矩阵), 15  
Transient response (瞬态响应), 31, 64  
Transition matrix (转移矩阵), 15, 27  
Transmission (传输)  
  cable (电缆), 296  
  carrier (载体), 296  
  data (数据), 102, 162, 198, 223, 297, 320

distance (距离), 155

Transponder (应答器), 145, 150, 175

Transportation (运输)

- advanced (先进的), 120
- data (数据), 121
- efficiency (效率), 121
- and logistics (和物流), 128, 130
- multimodal (多模式的), 121
- public and private (公私), 127
- systems (系统), 108, 120-123, 126-128, 142, 176, 179
- system sector (系统部门), 120, 122

Triplet (三元组), 94

True model (真实模型), 22

## U

Ubiquitous (普适的)

- broadband infrastructure (宽带基础设施), 125
- communication network (通信网络), 158
- computing (计算), 84, 86, 127, 133, 145, 164, 165, 167, 185-221, 223-231
- computing user interface (计算用户界面), 202
- connectivity (连通), 126
- information network (信息网络), 86, 111
- monitoring technologies (监测技术), 111
- plug and produce (即插即用), 86
- space (空间), 187, 205, 207, 208

Unauthorized access (未经授权的访问), 168, 198, 336, 339

Unexpected changes (意外变化), 317

Unidentifiable (无法识别), 22

Unified (统一的)

- modeling language (建模语言), 40, 95, 246, 247, 249
- representation (代表), 72

Unified modeling language (统一建模语言, UML), 40, 91, 94, 95, 244, 246-248, 272

Uniform (统一的)

- operating philosophy (操作原理), 322
- resource locators (统一资源定位器), 104, 108

Uniqueness of solutions (解的唯一性), 16

Unique solution (唯一解), 13, 16, 32

Unit (单元)

- cost (代价), 53, 54
- matrix (矩阵), 25
- step (步), 2, 29, 61, 64, 65

Unity (单位的)

- feedback system (反馈系统), 30, 62
- magnitude (幅度), 31

Universal (通用的)

- plug and play (即插即用), 187
- product code number (产品编号), 104

Unleashing humans (释放人类), 378

Unmanned vehicle (无人汽车), 117, 222-225

Unpredictable (不可预知的)

- variables (变量), 224

Unstable (不稳定的), 33, 64, 287

Unsuccessful logon attempts (失败的登录尝试), 338

Urban (城市的)

- life (生活), 103
- traffic control (交通管理), 127
- transportation (运输), 125

## V

Validation (确认), 96, 118, 237-239, 241, 243, 259, 263, 266, 277, 279, 281, 287, 293

Value chain (价值链), 115, 143, 163, 255, 313, 316, 326, 330, 332, 365, 379

Van der Pol oscillator (Van der Pol 振荡器), 14

Variable (变量)

- bidirectional shared (双向共享), 94
- global (全局的), 298-300

Vector (向量)

- equation system (方程组), 27-29
- function (函数), 9, 12

Vector-matrix (向量矩阵), 15, 23

Vehicle (车辆)

- data, 数据 (131)
- location (定位), 336
- protection (保护), 129
- road coordinated cyber physical system (道路协调信息物理系统), 127
- to vehicle (与车辆), 123
- tracking cyber physical system (跟踪信息物理系统), 127, 129-130
- tracking system (寻踪系统), 125, 127-132, 134

Verification (验证), 49, 50, 70, 72, 111, 117-119, 224, 237, 238, 243, 253, 258, 259, 263, 277, 280, 281, 287, 347, 368

Vertical integration (垂直集成), 96, 115, 133,

365

Vessel traffic seaborne systems (船舶海上运输系统), 125

computing environment (计算环境), 187

reality (现实), 189

world (世界), 82, 83, 120, 164, 378

V-model (V 模型)

phases (阶段), 285, 287

Volatile execution environment (易失性执行环境), 187

## W

Warehousing (仓储), 171, 351, 367

Waste management monitoring (废物管理监控), 161

Waterfall method (瀑布方法), 285

Wearable (可穿戴)

computing devices (计算设备), 102

devices (设备), 102, 191

Web service language (Web 服务语言), 206

Web storefront (Web 店面), 103

Weibull distribution (韦伯分布), 335

White (白)

noise process (噪声处理), 221

paper (纸), 124, 260, 354

White-noise (白噪声)

Wireless (无线)

body area network (区域网络), 102

communication (通讯), 102, 110, 127, 152, 154, 193, 194, 296, 320, 382, 383

network (网络), 102, 107, 109, 123, 125, 126, 145, 193, 203, 383

sensor networks (传感器网络), 102, 110, 141, 145, 151-162, 382

sensor node (传感器节点), 155, 158

sensor technology (传感器技术), 126

technology (技术), 102, 142, 336

Wireless Fidelity (无线保真传输, WiFi), 186, 194, 198, 204

Wiring (配线)

harness (线束), 89

Work (工作)

design (设计), 366, 380

flow (流), 200

flow step (流步骤), 200

life balance (生活平衡), 368, 387

lives (生活), 377-388

load (工作量), 65

models (模型), 160, 161, 378, 381

organization (组织), 365-368, 380, 387

places (地点), 185, 380

in progress (进行中), 114, 308

station (车站), 307-309

Workforce (劳动力)

educated (受过教育的), 88

skills (技能), 372

Working group Industry 4.0 (工作组工业 4.0), 387

Workplace (工作场所), 185, 366, 368, 378, 380

World (世界)

economic forum (经济论坛), 313

of work (的工作), 381-385

## Z

Zero (零)

error (误差), 30

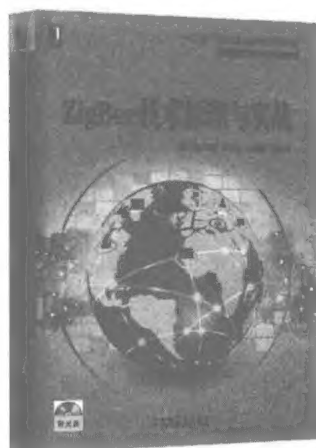
memory system (存储系统), 10

ZigBee (一种低功耗局域网协议)

network (网络), 297, 301



## 推荐阅读



### 物联网工程导论

作者：吴功宜等 ISBN: 978-7-111-38821-0 定价：49.00元

### 物联网通信技术

作者：吕慧等 ISBN: 978-7-111-52805-0 定价：49.00元

### 物联网信息安全

作者：桂小林等 ISBN: 978-7-111-47089-2 定价：45.00元

### 传感网原理与技术

作者：李士宁等 ISBN: 978-7-111-45968-2 定价：39.00元

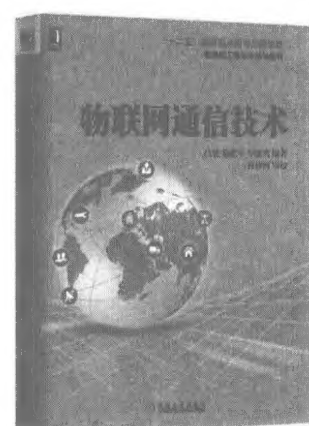
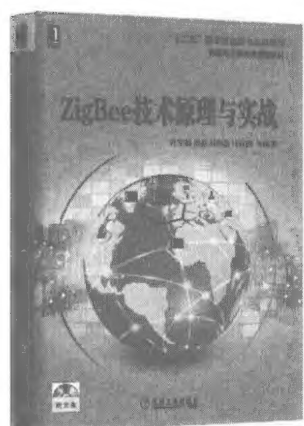
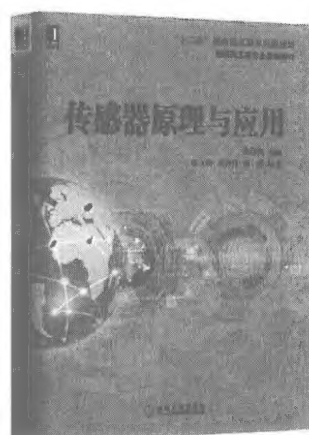
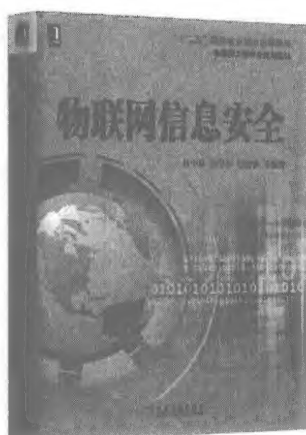
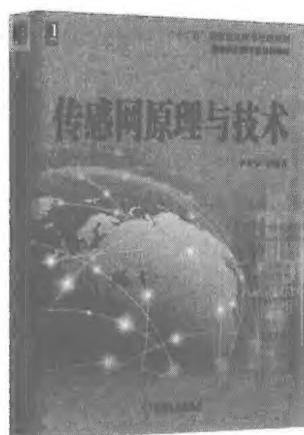
### ZigBee技术原理与实战

作者：杜军朝等 ISBN: 978-7-111-48096-9 定价：59.00元

### 传感器原理与应用

作者：黄传河 ISBN: 978-7-111-48026-6 定价：35.00元

## 推荐阅读



### 传感网原理与技术

作者：李士宁 等 ISBN：978-7-111-45968-2 定价：39.00元

### 物联网信息安全

作者：桂小林 等 ISBN：978-7-111-47089-2 定价：45.00元

### 传感器原理与应用

作者：郑阿奇 等 ISBN：978-7-111-48026-6 定价：35.00元

### ZigBee技术原理与实战

作者：杜军朝 ISBN：978-7-111-48096-9 定价：59.00元

### 物联网工程设计与实施

作者：黄传河 ISBN：978-7-111-49635-9 定价：45.00元

### 物联网通信技术

作者：黄传河 ISBN：978-7-111-52805-0 定价：49.00元

## 推荐阅读



### 深入理解计算机系统（英文版·第3版）

作者：（美）兰德尔 E.布莱恩特 大卫 R. 奥哈拉伦 ISBN: 978-7-111-56127-9 定价: 239.00元

本书是一本将计算机软件 and 硬件理论结合讲述的经典教材，内容涵盖计算机导论、体系结构和处理器设计等多门课程。本书最大的特点是为程序员描述计算机系统的实现细节，通过描述程序是如何映射到系统上，以及程序是如何执行的，使读者更好地理解程序的行为，找到程序效率低下的原因。

### 编译原理（英文版·第2版）

作者：（美）Alfred V. Aho 等 ISBN: 978-7-111-32674-8 定价: 78.00元

本书是编译领域无可替代的经典著作，被广大计算机专业人士誉为“龙书”。本书上一版自1986年出版以来，被世界各地的著名高等院校和研究机构（包括美国哥伦比亚大学、斯坦福大学、哈佛大学、普林斯顿大学、贝尔实验室）作为本科生和研究生的编译原理课程的教材。该书对我国高等计算机教育领域也产生了重大影响。

第2版对每一章都进行了全面的修订，以反映自上一版出版二十多年来软件工程、程序设计语言和计算机体系结构方面的发展对编译技术的影响。

# 信息物理系统计算基础 概念、设计方法和应用

Guide to Computing Fundamentals in Cyber-Physical Systems Concepts, Design Methods, and Applications

本书是一本介绍信息物理系统（CPS）相关概念和技术的基础教材，系统全面地介绍了信息物理系统的基础知识及其应用场景和社会影响。每章在介绍完基本技术内容后，都有实际的应用案例分析，使读者能从具体的应用中更好地理解书中所介绍的技术原理，也能够帮助读者掌握跨学科的知识。本书的读者除了需要熟悉基础微积分和概率统计知识，以及了解系统和软件工程方面的知识外，不需要其他的背景知识。

## 本书特色


- 每章包括自测练习，书末带有术语表与索引，全面辅助读者阅读理解。
- 提供各种教学支持材料，包括一套幻灯片和教学视频。
- 在定义CPS之前，介绍了系统和嵌入式计算系统的研究概况。
- 介绍了物联网、普适（泛在）计算的概念。
- 回顾了CPS的设计挑战及其对系统和软件工程的影响。
- 描述了工业4.0和数字制造革命背后的思想，包括智能和敏捷制造，以及制造业的信息安全。
- 描述了未来全球化、数字化工作环境所需技能的变化给社会带来的影响。

## 作者简介

**迪特玛 P. F. 莫勒**（Dietmar P. F. Möller）德国克劳斯塔尔工业大学教授，德国仿真科学中心会员，美国内布拉斯加-林肯大学电气工程系客座教授。



华章教育服务微信号

 Springer

投稿热线: (010) 88379604  
客服热线: (010) 88378991 88361066  
购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

华章网站: [www.hzbook.com](http://www.hzbook.com)  
网上购书: [www.china-pub.com](http://www.china-pub.com)  
数字阅读: [www.hzmedia.com.cn](http://www.hzmedia.com.cn)



上架指导: 计算机科学及应用

ISBN 978-7-111-59145-1



9 787111 591450 >

定价: 99.00元